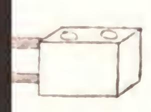


Fünf abhandlungen über absolute elektrische strom- und ...

Friedrich Kohlrausch, Wilhelm Eduard Weber, Rudolf Hermann Arndt Kohlrausch





OSTWALD'S KLASSIKER

DER

m. 26 Fig. im Text. Aus d. Italien. übers. u. herausg. v. A. v. Oettingen. (142 S.) ℳ 3.—.

› 12. **Kant's** Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels od. Versuch von der Verfassung und dem mechanischen Ursprunge des ganzen Weltgebäudes nach Newtonischen Grundsätzen abgehandelt. (1755.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen. (158 S.) ℳ 2.40.

› 13. **Coulomb,** 4 Abhdl. üb. d. Elektricität u. d. Magnetismus. (1785-1786.) Übers. u. herausg. v. W. König. Mit 14 Textfig. (88 S.) ℳ 1.80.

› 20. **Christiaan Huygens,** Abhandlung üb. d. Licht. (1678.) Herausg. von E. Lommel. 2. Auflage, durchgesehen und berichtigt von A. J. von Oettingen. Mit 75 Textfig. (115 S.) ℳ 2.—.

› 21. **W. Hittorf,** Über d. Wanderungen der Ionen während der Elektrolyse. (1853—1859.) I. Hälfte. Mit 1 Taf. Herausg. v. W. Ostwald. Zweite, erweiterte Auflage. (115 S.) ℳ 1.60.

› 23. —— —— II. Hälfte. Mit 1 Taf. Herausg. v. W. Ostwald. Zweite, durchgesehene Auflage. (142 S.) ℳ 1.50.

› 24. **Galileo Galilei,** Unterredungen u. mathem. Demonstrationen über 2 neue Wissenszweige etc. (1638.) 3. u. 4. Tag, mit 90 Fig. im Text. Aus dem Italien. u. Latein. übers. u. herausg. von A. von Oettingen. (141 S.) ℳ 2.—.

› 25. **Galileo Galilei,** Anhang zum 3. u. 4. Tag, 5. u. 6 Tag, mit 23 Fig. im Text. Aus dem Italien. u. Latein. übers. u. herausg. von A. von Oettingen. (66 S.) ℳ 1.20.

› 31. **Lambert's** Photometrie. (Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae). (1760.) Deutsch herausg. v. E. Anding. Erstes Heft: Theil I und II. Mit 35 Fig. im Text. (135 S.) ℳ 2.—.

› 32. —— —— Zweites Heft: Theil III, IV und V. Mit 32 Figuren im Text. (112 S.) ℳ 1.60.

› 33. **Lambert's** Photometrie. Drittes Heft: Theil VI und VII. — Anmerkungen. Mit 8 Figuren im Text. (172 S.) ℳ 2.50.



Nr. 36. **F. Neumann,** Über ein allgemein. Princip der mathemat. Theorie inducirter elektr. Ströme. (1847.) Herausg. von C. Neumann. Mit 10 Fig. im Text. (96 S.) *M* 1.50.

» 37. **S. Carnot,** Betrachtungen üb. d. bewegende Kraft d. Feuers und die zur Entwickelung dieser Kraft geeigneten Maschinen. (1824.) Übersetzt und herausgegeben von W. Ostwald. Mit 5 Figuren im Text. (72 S.) *M* 1.20.

» 40. **A. L. Lavoisier** u. **P. S. de Laplace,** Zwei Abhandlungen über die Wärme. (Aus den Jahren 1780 u. 1784.) Herausg. v. J. Rosenthal. Mit 13 Figuren im Text. (74 S.) *M* 1.20.

» 44. Das Ausdehnungsgesetz der Gase. Abhandlungen von **Gay-Lussac, Dalton, Dulong** u. **Petit, Rudberg, Magnus, Regnault.** (1802–1842.) Herausg. von W. Ostwald. Mit 33 Textfiguren. (213 S.) *M* 3.—.

» 52. **Aloisius Galvani,** Abhandlung üb. d. Kräfte der Electricität bei der Muskelbewegung. (1791.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen. Mit 21 Fig. auf 4 Taf. (76 S.) *M* 1.40.

» 53. **C. F. Gauss,** Die Intensität der erdmagnetischen Kraft auf absolutes Maass zurückgeführt. In der Sitzung der Kgl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen am 15. December 1832 vorgelesen. Herausgegeben von E. Dorn. (62 S.) *M* 1.—.

» 54. **J. H. Lambert,** Anmerkungen und Zusätze zur Entwerfung der Land- und Himmelscharten. (1772.) Herausgegeben von A. Wangerin. Mit 21 Textfiguren. (96 S.) *M* 1.60.

» 55. **Lagrange** u. **Gauss,** Abhandlungen über Kartenprojection. (1779 u. 1822.) Herausgeg. v. A. Wangerin. Mit 2 Textfig. (102 S.) *M* 1.60.

» 56. **Ch. Blagden,** Die Gesetze der Überkaltung und Gefrierpunktserniedrigung. 2 Abhandlungen. (1788.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen. (49 S.) *M* —.80.

» 57. **Fahrenheit, Réaumur, Celsius,** Abhandlungen über Thermometrie. (1724, 1730—1733, 1742.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen. Mit 17 Fig. im Text. (140 S.) *M* 2.40.

» 59. **Otto von Guericke's** neue »Magdeburgische« Versuche über den leeren Raum. (1672.) Aus dem Lateinischen übersetzt und mit Anmerkungen herausgegeben von Friedrich Dannemann. Mit 15 Textfiguren. (116 S.) *M* 2.—.

» 61. **G. Green,** Ein Versuch, die mathematische Analysis auf die Theorieen der Elektricität und des Magnetismus anzuwenden. (Veröffentlicht 1828 in Nottingham.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen und A. Wangerin. (140 S.) *M* 1.80.

» 63. **Hans Christian Oersted** und **Thomas Johann Seebeck,** Zur Entdeckung des Elektromagnetismus. (1820—1821.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen. Mit 30 Textfiguren. (83 S.) *M* 1.40.

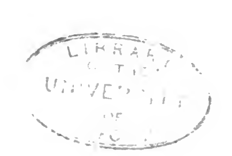
» 69. **James Clerk Maxwell,** Über Faraday's Kraftlinien. (1855 u. 1856.) Herausgegeben von L. Boltzmann. (130 S.) *M* 2.—.

» 70. **Th. J. Seebeck,** Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz. (1822—1823.) Herausgegeben von A. J. von Oettingen. Mit 33 Textfiguren. (120 S.) *M* 2.—.

» 76. **F. E. Neumann,** Theorie der doppelten Strahlenbrechung, abgeleitet aus den Gleichungen der Mechanik. (1832.) Herausgegeben von A. Wangerin. (52 S.) *M* —.80.

» 79. **H. Helmholtz,** 2 hydrodynamische Abhandlungen. I. Über Wirbelbewegungen. (1858.) — II. Über discontinuirliche Flüssigkeitsbewegungen. (1868.) Herausg. v. A. Wangerin. (80 S.) *M* 1.20.

» 80. **H. Helmholtz,** Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden. (1859.) Herausgegeben von A. Wangerin. (132 S.) *M* 2.—.





WILHELM WEBER

1804—1891



RUDOLF KOHLRAUSCH

1809—1858



Fünf Abhandlungen

über

Absolute elektrische Strom- und Widerstandsmessung

Von

Wilhelm Weber und **Rudolf Kohlrausch**

Herausgegeben

von

Friedrich Kohlrausch

Mit zwei Bildnissen
und zwei Figuren im Text



Leipzig
Verlag von Wilhelm Engelmann
1904.

Inhaltsverzeichnis.





[83]

Messung starker galvanischer Ströme bei geringem Widerstande nach absolutem Maße.

Von

Wilhelm Weber.

(Gauß und Weber, Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1840, Seite 83—90.)

Es ist in dem Aufsatze über die magnetische Friktion [1]) mehrmals der Fall vorgekommen, daß es von Wichtigkeit war, die Intensität eines galvanischen Stroms nach absolutem Maße kennen zu lernen, um ihn mit der Intensität anderer Ströme unter beliebigen Verhältnissen vergleichen zu können. Es wurde nämlich ein eisernes Rad durch einen galvanischen Strom magnetisiert und seine magnetische Friktion gemessen: es sollte dabei der Strom näher bestimmt werden, welcher diese Wirkung hervorgebracht hatte. Es hätte zu diesem Zwecke leicht das Mittel angewendet werden können, welches *Faraday* in der siebenten Reihe seiner Experimental-Untersuchungen über Elektrizität (Philosophical Transactions f. 1834 und *Poggendorffs* Annalen 1834, Bd. 33, S. 316 ff.) angegeben hat, wonach die Stärke des Stroms durch die Menge des von ihm in bestimmter Zeit zersetzten Wassers gemessen wird; jedoch wäre der Strom, wenn er zu diesem Zwecke durch einen Wasserzersetzungsapparat geleitet worden wäre, sehr geschwächt worden, was bei jenen Versuchen, die einen ungeschwächten Strom erforderten, nicht geschehen durfte.

Der Fall, daß die Messung der absoluten Stromintensität durch die Menge des zersetzten Wassers wegen der dazu notwendigen Leitung des Stroms durch einen Wasserzersetzungsapparat nicht zulässig ist, kommt häufig vor, zumal bei einfachen Ketten, wo ein ohne jene Leitung sehr starker Strom

durch dieselbe so geschwächt wird, daß gar keine Wasserzersetzung erfolgt und also auch von einer Messung des zersetzten [84] Wassers nicht die Rede sein kann. In solchen Fällen muß eine andere Methode angewendet werden, wobei der Strom bloß durch starke und kurze Kupferdrähte geleitet wird, welche den Widerstand nicht merklich vergrößern.

Es wurde daher in obigen Versuchen statt der von *Faraday* angegebenen Methode folgendes sehr einfache Verfahren angewendet, daß ein bestimmtes Stück des dicken Leitungsdrahts in einiger Entfernung von einer Magnetnadel geradlinig so vorbeigeführt wurde, daß letztere beträchtlich vom magnetischen Meridian abwich, während die ganze übrige Leitungskette in solcher Ferne und Lage sich befand, daß auf ihre Wirkung auf die Nadel keine Rücksicht genommen zu werden brauchte. Es leuchtet dann von selbst ein, daß aus der gemessenen Ablenkung der Nadel mit Berücksichtigung der Länge und Lage des wirksamen Leitungsdrahts und der absoluten Intensität des Erdmagnetismus am Beobachtungsorte eine absolute Bestimmung der Intensität des galvanischen Stroms gewonnen werden konnte, wie sie S. 49 gegeben worden ist. Diese Methode hat übrigens den Vorzug, daß sie eine Bestimmung der absoluten Stromintensität für jeden Augenblick gestattet, während nach *Faradays* Methode nur mittlere Resultate für längere Zeiträume erhalten werden. Man kann auch Versuche machen, wo man die Intensität eines und desselben Stroms gleichzeitig nach dieser und nach *Faradays* Methode mißt, und dadurch eine Vergleichung der, beiden Messungsweisen zum Grunde gelegten, Maße erhalten; doch ist diese Vergleichung zur absoluten Bestimmung des Stroms nicht notwendig. Notwendig ist eine solche Vergleichung nur beim gewöhnlichen Galvanometer, welches aus einer mit Multiplikator versehenen Magnetnadel besteht, wenn damit absolute Bestimmungen erhalten werden sollen, zu denen es unmittelbar nicht geeignet ist, wie *Jacobi* in *Poggendorffs* Annalen Bd. 48 getan hat.

Bei dem häufig eintretenden Bedürfnis, die absolute Intensität galvanischer Ströme einfacher Ketten zu bestimmen, wobei *Faradays* Methode den Dienst versagt, kann ein Instrument, welches, nach den oben erwähnten Prinzipien konstruiert, direkt zum Ziele führt, von großem Nutzen sein, weshalb hier einige Erläuterungen über seine vorteilhafteste Einrichtung und einige damit gemachte Messungen angeführt werden mögen.

[85] Das Instrument ist desto zweckmäßiger konstruiert, je größer der Abstand des Leitungsdrahts im Vergleich zur Nadellänge ist, weil dann die Verteilungsweise des Magnetismus in der Nadel desto weniger in Betracht kommt, wenn nur bei diesem größeren Abstand die zu messende Ablenkung groß genug bleibt, um mit Genauigkeit beobachtet zu werden. Es leuchtet daraus von selbst der Vorteil ein, den es hat, wenn der Leitungsdraht, statt geradlinig an der Nadel vorbeigeführt zu werden, (was bei den oben erwähnten Versuchen in Ermangelung eines eigenen Instruments bloß um der leichteren Ausführung willen geschah) in einem weiten vertikalen Kreise ganz um die Nadel herumgeführt wird. Bei gleicher Ablenkung kann dann die Entfernung aller Teile dieses Leitungsdrahts weit größer sein. Auch ist, wenn der Leitungsdraht genau einen vertikalen Kreis um die Mitte der Nadel bildet, die Berechnung der absoluten Intensität des galvanischen Stroms aus der beobachteten Ablenkung der Nadel, sehr einfach und leicht. Diese Kreisform des Leiters gewährt endlich noch den besonderen Vorteil, daß die übrige Kette sehr leicht so geführt werden kann, daß sie keinen merklichen Einfluß auf die Nadel ausübt. Es ist dazu nur nötig, die beiden Teile, welche den Strom zu- und ableiten, recht nahe neben einander fortzuführen, wo ihre Wirkungen auf die Nadel sich aufheben. Das erste Stück vom Ringe an wird der Strom am besten durch zwei kupferne Röhren geleitet, deren eine die andere umschließt, jedoch isoliert von ihr gehalten wird, wie Fig. 1 darstellt. Der Querschnitt des kreisförmigen Leiters muß so groß sein, daß sein Widerstand unmerklich ist.

Ich habe ein Instrument hiernach einrichten lassen, dessen Kupferring $198\frac{1}{2}$ mm Durchmesser hatte, und dessen Querschnitt 30 qmm betrug. Dieser Reif war unten aufgeschnitten, und das eine Ende mit der einen Leitungsröhre, das andere Ende mit der andern Leitungsröhre zusammengelötet. Diese ineinander gesteckten, aber isolierten Röhren führten den Strom 100 mm abwärts zu zwei 4 mm dicken 1 m langen Leitungsdrähten, welche dicht unter einander zu zwei Quecksilbernäpfchen gingen, die mit den beiden Platten der galvanischen Kette in Verbindung gesetzt werden konnten. Die Magnetnadel stand in der Mitte des Kreises [86] auf einer an dem Kreis befestigten Holzplatte. Der Kreis selbst stand auf einem hölzernen mit Stellschrauben versehenen Dreifuß. Die Länge der Nadel betrug 50 mm und bewegte sich auf einem in Grade

geteilten Kreisbogen. Der Gebrauch des Instruments bedarf keiner Erläuterung. Die Berechnung der absoluten Intensität

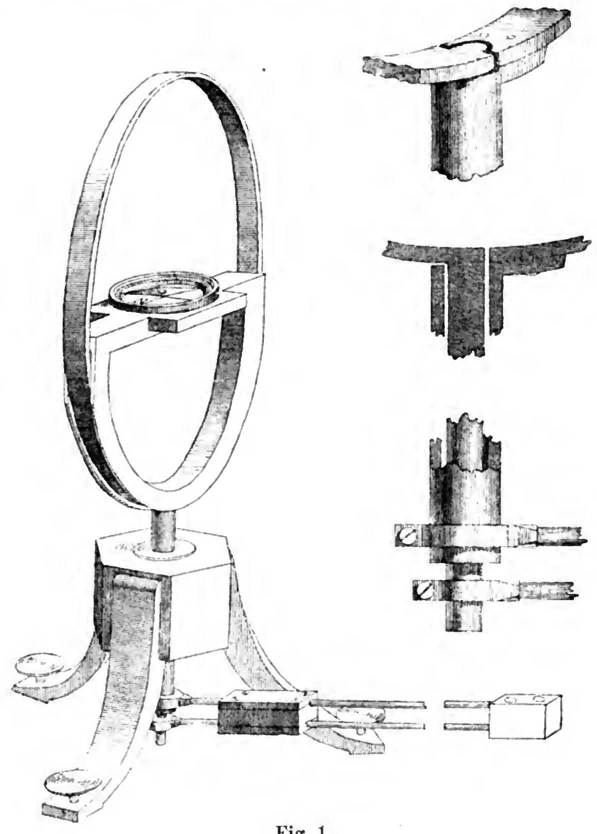


Fig. 1.

aus der beobachteten Ablenkung der Nadel besteht darin, daß die Tangente des Ablenkungswinkels mit einer konstanten Zahl multipliziert wird, die aus der Größe des Kupferrings und aus

der absoluten horizontalen Intensität des Erdmagnetismus am Beobachtungsorte abgeleitet wird. Bezeichnet R (= 99^{mm}125) den Halbmesser des Rings, T (= 1,7833) die horizontale Intensität des Erdmagnetismus (in Göttingen), so ist jener konstante Faktor[2])

$$\frac{1}{\pi} \cdot RT = 56{,}2675.$$

Bezeichnet φ die beobachtete Ablenkung, so ist die gesuchte absolute Intensität des gemessenen Stroms

$$\frac{1}{\pi} \cdot RT \cdot \operatorname{tang} \varphi = 56{,}2675 \cdot \operatorname{tang} \varphi.$$

Zum bequemeren Gebrauche läßt sich leicht eine Tafel einrichten, welche den gesuchten Wert der absoluten Stromintensität für jeden beobachteten Wert von φ unmittelbar gibt. So leicht und schnell wie mit diesem Instrumente wird man solche absolute Messungen mit keinem andern ausführen können.

Es bleibt noch ein Wort zu sagen übrig über das der angegebenen Berechnung zum Grunde gelegte Maß der Intensität. Derjenige Strom ist nämlich hierbei als Maß angenommen, der, wenn er die Flächeneinheit umgeht, in der Entfernung ebenso wirkt, wie das in der *Intensitatis vis magneticae* festgesetzte Maß des freien Magnetismus *).

[**87**] Noch möge bemerkt werden, daß die Beobachtungen sehr erleichtert werden, wenn man die Boussole mit einem Dämpfer versieht, welcher bewirkt, daß sie schnell zur Ruhe kommt. Zu feineren Messungen würde es nötig sein, die Bussole mit einem kleinen Magnetometer zu vertauschen, wobei aber ein weit größerer Kupferkreis angewendet werden müßte, auch wenn die Nadel sehr kurz, z. B. nur 60 bis 80 mm lang, wäre. Die Ablenkung der Nadel bei starken Strömen

*) Man beachte, daß dieser Strom halb so stark ist, wie derjenige, welcher bei der Einheit der Länge des Leiters und des Abstands von der Magnetnadel auf die Einheit des freien Magnetismus in der Nadel die Einheit des Drehungsmoments ausübt, auf welchen letzteren oben [nämlich in dem eingangs angezogenen Aufsatze über magnetische Friktion. *F. K.*] die gemessenen Stromintensitäten bezogen wurden. Es ergibt sich dieses leicht aus dem Grundgesetze des Galvanismus, wie es Art. 1 der Allgemeinen Lehrsätze im vorigen Bande der Resultate angegeben und hier schon angeführt worden ist. [Vgl. jedoch Anm. 2. *F. K.*]

würde dann noch genau meßbar sein, wenn auch der Kupferring 600 mm Durchmesser hätte.

Es mögen nun einige mit diesem Instrument gemachte Messungen angeführt werden. Zur Beurteilung der größten Wirkungen, welche man mit galvanischen Strömen hervorbringen kann, ist es von Wichtigkeit, die Stromintensitäten der einfachen Ketten zu messen, ohne den Widerstand, den sie besitzen, durch den Leitungsdraht merklich zu vergrößern. Diese Messung gibt dann unmittelbar das Maximum der Stromstärke, dem man sich durch Vermehrung der Zahl der Plattenpaare nähern kann, wenn der Strom einen größeren Widerstand überwinden muß. Folgende Tafel gibt die Resultate dieser Messungen für 5 einfache Ketten von verschiedener Größe und Zusammensetzung:

Bezeichnung der Kette	Beobachtete Ablenkung	Berechnete absolute Intensität*)
A	72° 2′	173,52
B	78° 15′	270,52
C	66° 40′	130,44
D	54° 2′	77,54
E	73° 2′ 5	184,52

Über die Größe und Zusammensetzung dieser Ketten ist folgendes zu bemerken:

A war ein *Daniell*scher Becher, wo die von der Kupfervitriollösung berührte Kupferfläche 9 qdm groß war. Die Kupfervitriollösung, sowie auch das Wasser, welches den amalgamierten Zinkstab umgab, war mit 10 Prozent Schwefelsäure vermischt.

B war ein *Grove*scher Becher. Ein Platinbecher von 1,9 qdm innerer Oberfläche wurde mit gewöhnlicher Salpetersäure gefüllt, während ein kleiner poröser Tonbecher, [**88**] mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt, mitten darin stand, und eine amalgamierte Zinkstange in letztere getaucht wurde. Die Schwefelsäure war mit 80 Prozent Wasser vermischt.

C war ein Becher nach der Angabe des Herrn Professor *Poggendorff* mit einer Eisenplatte in rauchender Salpetersäure,

*) [Nach dem Vorigen durch 2 zu teilen um [Mm,Mg,Sec]-Einheiten zu geben, also durc h200 geteilt CGS-Einheiten. *F. K.*]

statt der Platinplatte in gewöhnlicher Salpetersäure der *Grove*schen Säule. Die Eisenplatte wurde von beiden Seiten von der Salpetersäure berührt, die ganze Berührungsfläche betrug aber dabei nur $\frac{3}{4}$ dm. Die Schwefelsäure, welche die Tonzelle umgab, und worin ein amalgamierter Zinkcylinder eingetaucht war, war mit 90 Procent Wasser verdünnt.

D war ein Becher von gleicher Größe und Zusammensetzung wie der vorige, bloß mit dem Unterschiede, daß der in verdünnte Schwefelsäure eingetauchten Zinkplatte des vorigen Bechers ebenfalls eine Eisenplatte substituiert wurde. Auf die starken Ströme, welche hier entstehen, ungeachtet nur ein einziges Metall gebraucht wird, ist schon früher (Göttinger gel. Anz. 1841, S. 81) aufmerksam gemacht worden.

E endlich war ein Becher nach Angabe des Hrn. Professor *Bunsen* in Marburg. Ein aus Steinkohle und Koks fest zusammengebackener Kohlencylinder, der mit Salpetersäure durchzogen war, wurde mit $1\frac{7}{10}$ qdm Oberfläche in verdünnte Schwefelsäure getaucht und in geringem Abstand von einem Zinkcylinder umgeben. Die Schwefelsäure war mit 90 Prozent Wasser verdünnt.

Die oben angeführten Resultate sind die größten, welche bei der Prüfung mehrerer ganz gleich konstruierter Becher erhalten wurden. Von der ersten, vierten und fünften Sorte waren jedesmal 4 Stück, von der dritten 2 Stück, von der zweiten nur eins geprüft worden. Die größte Differenz bei diesen Wiederholungen hatte sich bei der fünften Art ergeben und hatte ihren Grund wahrscheinlich in der oft unvollkommenen Leitung des Stroms aus der Kohle in den Kupferdraht. Die 3 andern Becher hatten nämlich ungefähr nur einen halb so starken Strom wie den oben angeführten ergeben.

Der stärkste Strom unter den hier gemessenen ist in obigen Versuchen mit der *Grove*schen Kette erhalten worden, dessen Intensität = 270,52 gefunden wurde. Ein solcher Strom, wenn er ungeschwächt durch Wasser ginge, würde in jeder [**89**] Sekunde 2^{mg} 536 Wasser zersetzen, oder ungefähr $4\frac{3}{4}$ ccm Knallluft entwickeln, wie im folgenden Aufsatz gezeigt werden wird. Wenn ein solcher Strom ein Quadratmeter Fläche umschließt, so übt er in die Ferne eben so große magnetische Kräfte, wie ein sehr starker Stahlmagnet von 676,3 g Gewicht (wo man 400 Maß Magnetismus auf 1 mg Stahl rechnen kann).

Man benutzt häufig dünne Platindrähte, um durch ihr Glühen eine Schätzung der Stromstärke zu erhalten. Eine

Messung ergab, daß ein deutliches, am Tage sichtbares Glühen eines $\frac{2}{15}$ mm dicken Platindrahts von einem Strom, dessen absolute Intensität = 20 war, hervorgebracht wurde.

Um die in einem solchen Drahte frei werdende Wärmemenge selbst zu erfahren, wurde ein $28\frac{1}{2}$ mm langes Stück von jenem $\frac{2}{15}$ mm dicken Platindraht durch 114 g destillierten Wassers geführt. Die durch einen galvanischen Strom, der durch diesen Draht geleitet wurde, darin frei gewordene Wärme teilte sich dem umgebenden Wasser mit und konnte durch die Temperaturerhöhung des Wassers, in welches ein Thermometer eingetaucht war, gemessen werden. Derselbe Strom, welcher die Erwärmung des Drahts und des Wassers hervorbrachte, wurde durch den Kupferkreis des Galvanometers geleitet und lenkte die im Mittelpunkte aufgestellte Magnetnadel vom magnetischen Meridian ab. Die folgende Tafel gibt die Resultate einer solchen Messungsreihe, wo die anfängliche Temperatur des Wassers 15° Cent. betragen hatte.

Zeit	Ablenkung	Temperatur des Wassers
11′ 0″	52° 30′	21,5
11 30	52 30	22,0
13 30	51 30	23,0
15 0	51 30	24,0
17 0	52 0	25,0
19 50	51 50	26,0
20 30	51 20	27,0
22 30	51 0	28,0
24 30	50 30	28,5
26 0	50 10	29,0
29 0	49 20	30,0

[**90**] Der Unterschied x der anfänglichen Temperatur des Wassers und der Temperatur nach t Minuten läßt sich hiernach durch

$$x = 0{,}95 \cdot t - 0{,}015 \cdot tt$$

darstellen[3]), woraus folgt, daß wenn die Wärmeentwicklung im Drahte der Stromintensität proportional ist, ein Strom, dessen Intensität = 1 ist, in 1 Minute den beschriebenen Platindraht so erwärmte, daß die Temperatur von 1 g Wasser um 1°4 Cent. stieg. Wurde der Draht im Wasser durch-

schnitten, so war die Ablenkung der Nadel Null, zum Beweis, daß kein meßbarer Teil des Stroms durch das Wasser ging.

Es ist zu wünschen, daß bei Versuchen mit starken galvanischen Strömen ihre absolute Intensität immer auf eine der hier beschriebenen ähnliche Weise gemessen und angegeben werde, um die unter verschiedenen Verhältnissen von verschiedenen Beobachtern gewonnenen Resultate unter einander vergleichbar zu machen und ihre Übereinstimmung prüfen zu können.



[91]

Über das elektrochemische Äquivalent des Wassers.

Von

Wilhelm Weber.

(Gauß und Weber, Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1840, Seite 91—98.)

Nach *Faradays* zahlreichen Versuchen scheint es keinem Zweifel unterworfen zu sein, daß bei chemischen Zersetzungen durch den galvanischen Strom für jeden Körper die zersetzte Masse desselben zu der darauf verwandten Stromquantität, d. h. zu der während der Zersetzung durch den Querschnitt der Kette gegangenen Elektrizitätsmenge, in einem konstanten Verhältnisse stehe, wie auch der galvanische Strom hervorgebracht werde, und unter welchen Verhältnissen der zersetzte Körper sich befinden möge. Diesem wichtigen Gesetze ist noch das andere von *Faraday* gefundene eben so wichtige Resultat hinzuzufügen, daß chemisch äquivalente Massen verschiedener Körper zu ihrer Zersetzung gleiche Stromquantitäten, d. i. gleiche Elektrizitätsmengen, gebrauchen. Z. B. sind 9 g Wasser und 36,5 g Salzsäure chemisch äquivalente Massen und brauchen nach *Faraday* gleiche Elektrizitätsmengen zu ihrer Zersetzung in Sauerstoff- und Wasserstoffgas und in Chlor- und Wasserstoffgas. Wenn man hiernach von der Elektrizität wie von einem Körper spricht, welcher sich mit andern Körpern (mit den Bestandteilen des zersetzten Körpers) nach ihren chemisch bestimmten äquivalenten Verhältnissen verbindet, und eine gewisse Quantität (positiver oder negativer) Elektrizität als Maß annimmt, und die Massen anderer Körper bestimmt, die sich damit verbinden, so nennt *Faraday* die letzteren elektrochemische Äquivalente, zur Unterscheidung von den chemischen Äquivalenten, denen sie proportional seien. Die chemischen

und elektrochemischen Äquivalente unterscheiden sich hiernach bloß durch das verschiedene ihnen zugrunde gelegte Maß, [92] nämlich bei jenen die Masseneinheit des Sauerstoffs (oder Wasserstoffs), bei diesen die Masseneinheit der Elektrizität. *Faraday* selbst hat zwar die Masse der Elektrizität, die er hierbei als Einheit annehme, nicht näher bestimmt; wollte man dazu aber die Masse nehmen, welche sich mit der Masseneinheit Sauerstoff (oder Wasserstoff) im Wasser zu Sauerstoffgas (oder Wasserstoffgas) verbindet, so würden die beiden Arten von äquivalenten Massen vollkommen identisch werden. Sollen daher elektrochemisch äquivalente Massen etwas anderes als chemisch äquivalente Massen bedeuten, so müssen sie nach einem andern Grundmaße der Elektrizität gemessen werden, welches aus einer andern Klasse elektrischer Wirkungen abgeleitet wird. Am nächsten bietet sich dazu die Klasse der magnetischen Wirkungen der Elektrizität im galvanischen Strome dar, weil diese Wirkungen in der Lehre vom Magnetismus auf absolute Maße zurückgeführt und genaue Messungsmethoden dafür ausgebildet worden sind.

Als absolutes Maß der Elektrizität (der positiven oder negativen oder beider zusammen) wird hiernach diejenige Menge Elektrizität genommen, die in der Zeiteinheit (Sekunde) durch den Querschnitt eines Leiters gehen muß, welcher in einer Ebene die Flächeneinheit begrenzt, um in der Ferne identische Wirkungen mit dem absoluten Grundmaß des freien Magnetismus hervorzubringen.*)

Es wird nun von besonderem Interesse sein, mit Zugrundelegung dieses absoluten Maßes der Elektrizität das elektrochemische Äquivalent irgend eines Körpers, z. B. das des Wassers zu bestimmen, woraus es dann leicht ist, nach dem von *Faraday* entdeckten Gesetze die elektrochemischen Äquivalente anderer Körper mit Hilfe ihrer chemisch bestimmten Äquivalente, denen sie proportional sind, abzuleiten. Die Bestimmung des elektrochemischen Äquivalents des Wassers mit Zugrundelegung des oben festgesetzten Maßes der Elektrizität soll nun den Gegenstand dieses Aufsatzes bilden.

Zu diesem Zwecke ist es also erforderlich, daß irgend eine meßbare magnetische Wirkung des galvanischen Stroms beobachtet werde, während eine bestimmte Quantität Wasser

*) [Dies ist wohl die erste Definition der Einheit einer Elektrizitätsmenge in elektromagnetischem Maße. *F. K.*]

zersetzt wird. Dazu ist aber weder die Wirkung des Stroms auf die Sinusbussole von *Pouillet* noch auf die Tangenten- [**93**] bussole von *Nervander* brauchbar, weil diese Instrumente zwar richtige Vergleichungen der Stromintensitäten, aber keine absoluten Bestimmungen geben können. Das im vorigen Aufsatz beschriebene Instrument scheint daher allein dazu geeignet zu sein. In der Tat ist dies das einfachste und bequemste, wenn es sich nicht um feinere Messungen handelt, und selbst diese würden sich damit ausführen lassen, wenn das Instrument selbst auf die feinere oben S. 7 angegebene Weise ausgeführt würde, daß nämlich der Kupferkreis sehr groß, die Nadel aber sehr klein und dabei doch wie in einem Magnetometer an einem Faden aufgehangen und mit Spiegel versehen wäre, um mit Fernrohr und Skala beobachtet zu werden.

In Ermangelung der feineren Ausführung eines solchen Instruments habe ich ein auf andern Prinzipien beruhendes, zu andern Zwecken bestimmtes Instrument*) benutzt, wovon hier kurz erwähnt werden möge, was zum vorliegenden Zwecke nötig ist. Es wird dabei gar keine Magnetnadel zu Hilfe genommen, sondern bloß der Leiter des galvanischen Stroms selbst benutzt.

Ein mit Seide übersponnener Kupferdraht von bekannter Länge wird auf einer cylindrischen Rolle von bestimmtem Durchmesser sorgfältig aufgewunden, so daß alle Windungen einem Systeme konzentrischer Kreise sehr nahe kommen, und der Flächeninhalt dieser Kreise für die von jenem Drahte umwundene Fläche gesetzt werden kann, der aus der Länge des Drahts, dem Durchmesser der Rolle und der Zahl der Umwindungen leicht berechnet werden kann und mit S bezeichnet werde.

Die beiden Enden des Drahts führen zu zwei voneinander isolierten Metallhäkchen an der Rolle, an denen zwei andere nicht übersponnene feine Drähte angeknüft sind, an denen die ganze Drahtrolle bifilar aufgehangen wird.

Die bifilare Aufhängung der Rolle an den beiden letzteren Drähten hat einen doppelten Zweck: erstens nämlich denselben wie beim Bifilarmagnetometer, um eine bestimmte Direktions-

*) [Unter dem Namen Bifilargalvanometer später in mancherlei Gestalt und Größe angewendet. Leider ist über dieses erste Instrument aus der Beschreibung nicht viel zu entnehmen. Nähere Angaben haben sich nicht ermitteln lassen. *F. K.*]

kraft D zu gewinnen, und darnach alle Kräfte, die auf die Rolle wirken und sie zu drehen suchen, zu bestimmen. Diese Direktionskraft kann zwar aus der Länge der Aufhängungsdrähte, ihrem Abstand und aus dem von ihnen getragenen Gewichte (insoweit nicht ihre eigene Elastizität etwa berücksichtigt [**94**] werden muß) berechnet werden, doch findet man dieselbe genauer durch die in der Intensitas zur Bestimmung des Trägheitsmoments vorgeschriebenen Versuche, auf die hier verwiesen werden kann.

Jene beiden Aufhängungsdrähte haben aber zweitens hier noch den besonderen Zweck, daß sie die Brücke bilden, durch welche der Strom sowohl von außen zum Drahte, als auch wieder zurückgeführt wird, ohne daß dadurch die Beweglichkeit der Rolle im geringsten beeinträchtigt wird, wie es der Fall ist, wenn man Metallspitzen gebraucht, die an der Rolle befestigt sind und in Quecksilbernäpfchen tauchen, wo die unvermeidliche Reibung keine Messungen gestattet.

Durch die bifilare Aufhängung wird erreicht, daß auch dann, wenn der Strom durch die Rolle hindurchgeht, der Stand und die Schwingungen derselben mit gleicher Feinheit wie der Stand und die Schwingungen des Bifilarmagnetometers beobachtet werden können. Es ist daher gestattet, zu ihrer Beobachtung sich auch derselben feinen Hilfsmittel zu bedienen, nämlich einen Spiegel an der Rolle zu befestigen und darin das Bild einer entfernten Skala mit einem Fernrohr zu beobachten. Auf diese Weise ist der Weg zu den feinsten galvanischen Messungen gebahnt, ohne Magnetnadeln zu Hilfe zu nehmen.

Es ist leicht, das Statif, an welchem die Rolle aufgehängt ist, zuerst so zu stellen, daß die Rolle den nämlichen Stand behält, wenn ein Strom von beliebiger Stärke bald vorwärts, bald rückwärts durch die Rolle geleitet wird, und hernach das ganze System um eine vertikale Achse 90^0 zu drehen. Alsdann ist das Instrument zur Ausführung unserer Messung vorbereitet.

Die Messung besteht dann darin, daß der nämliche Strom, der im Wasserzersetzungsapparate das Wasser zersetzt, durch unser Instrument geleitet wird, wo dann die Kraft des horizontalen Teils des Erdmagnetismus den Stand ändert und eine Ablenkung hervorbringt. Diese Ablenkung muß während der Dauer der Wasserzersetzung in kurzen Zwischenräumen genau beobachtet werden. Es leuchtet dann leicht ein, daß die

absolute Intensität G des galvanischen Stroms für irgend einen Augenblick, wo die Ablenkung φ beobachtet wird, durch folgende Gleichung bestimmt sei:

$$STG = D \operatorname{tang} \varphi,$$

[**95**] wo T die absolute horizontale Intensität des Erdmagnetismus am Beobachtungsorte bezeichnet. Ist also T bekannt und S und D, wie oben angegeben worden ist, genau bestimmt, so läßt sich die Intensität G aus der beobachteten Ablenkung φ berechnen, und aus allen ihren Werten für den Zeitraum t, wo die Wasserzersetzung geschah, die Quantität E der durch die Rolle gegangenen und zur Wasserzersetzung verbrauchten Elektrizität

$$E = \int G\,dt$$

mit großer Genauigkeit nach dem oben festgesetzten absoluten Maße bestimmen. Dividiert man hiermit die in Milligrammen ausgedrückte Menge des zerlegten Wassers W, so gibt der Quotient $\frac{W}{E}$ diejenige Menge Wasser, welche durch das festgesetzte absolute Maß der Elektrizität zerlegt wird, d. i. das gesuchte elektrochemische Äquivalent des Wassers.

Nach dieser Auseinandersetzung der angewandten Messungsmethode lassen sich die Resultate der Messungen selbst kurz zusammenfassen.

Der auf der Rolle aufgewundene Draht bildete 1130 Umwindungen; die Peripherie der Rolle war 164 mm; die Länge des Drahts 253 600 mm. Hieraus ergibt sich*) S:

$$S = 4638330 \text{ qmm.}$$

Das Trägheitsmoment der Rolle K war nach bekannten Vorschriften gefunden worden:

$$K = 779400000.$$

Die Schwingungsdauer t, die sich etwas mit der Temperatur änderte, war

bei der 1. und 2. Messung	$t = 8''0702$	118111000
bei der 3. »	$t = 8''0803$	117817000
bei der 4. und 5. »	$t = 8''0904$	117523000

*) [Nämlich $164 : 2\pi = 26{,}10 = r_0$ als innerer, $253600 : (2\pi \cdot 1130) = 35{,}72$ als mittlerer, folglich $45{,}34 = r_1$ als äußerer Halbmesser. Aus r_0 und r_1 folgt dann $S = \frac{1}{3}\pi N(r_0^2 + r_0 r_1 + r_1^2)$. F. K.]

woraus sich die in der letzten Kolumne angegebenen Werte der Direktionskraft $\frac{\pi\pi K}{tt}$ ergeben.

Die absolute horizontale Intensität T des Erdmagnetismus [**96**] konnte zur Zeit dieser Versuche in Göttingen nach einer fast gleichzeitigen Messung im magnetischen Observatorium

$$T = 1,7833$$

angenommen werden; jedoch wurden diese Beobachtungen in keinem eisenfreien Lokale, sondern in einem Raume der Sternwarte gemacht, wo in mäßigen Abständen sehr viel Eisen sich befand. Es wurde daher durch komparative Messungen die horizontale Intensität an diesem Beobachtungsorte mit der im magnetischen Observatorium verglichen, und es ergab sich daraus die absolute Intensität des Erdmagnetismus für die Stelle, wo die Versuche gemacht wurden:

$$T = 1,7026.$$

Endlich ergab die gleichzeitige Beobachtung des Wasserzersetzungsapparats und des Galvanometers in den fünf Messungen folgende Resultate:

	Zersetztes Wasser in Milligrammen	Zeitraum der Zersetzung	Elektrizitätsmenge nach absolutem Maße*)
1.	14,2346	1168″	1522,44
2.	14,2026	1280	1504,92
3.	14,0872	1137,5	1506,46
4.	14,0182	1154	1501,43
5.	13,9625	1263	1484,90

Es ergeben sich hieraus für das elektrochemische Äquivalent des Wassers folgende fünf Resultate:

	0,009350	− 0,000026
	0,009437	+ 0,000061
	0,009351	− 0,000025
	0,009337	− 0,000039
	0,009403	+ 0,000027
folglich im Mittel	0,009376	

*) [Die angewendete Stromstärke betrug etwa 0,013 CGS. *F. K.*]

Die Unterschiede der einzelnen Messungen von diesem Mittelwerte sind in der letzten Kolumne bemerkt.*)

Es möge noch beigefügt werden, daß die Menge des zersetzten Wassers, wie gewöhnlich, aus dem Volumen der entwickelten Gase bestimmt wurde, und zwar wurden beide Gase aufgefangen und gemessen. Um die Absorption der Gase durch das Wasser zu vermeiden, geschah die Aufsammlung der [**97**] ersteren über eine Quecksilberwanne, welche Herr Professor *Wöhler* dazu zu leihen die Güte hatte. Das zu zersetzende Wasser bestand in wenigen Tropfen, welche mit Schwefelsäure vermischt das zugeschmolzene Ende einer *S*-förmig gekrümmten Röhre einnahm und den Dienst einer Retorte hierbei vertrat. Die atmosphärische Luft war gänzlich ausgeschlossen. Zur Durchleitung des galvanischen Stroms durch das Wasser dienten zwei Platindrähte, die in die Röhre eingeschmolzen waren und, ohne sich zu berühren, durch das Wasser gingen. Die Wasserzersetzung hatte schon längere Zeit vor dem Anfang der Messung begonnen. Das Gas wurde feucht gemessen. Die Wände der Röhre, in welcher es aufgefangen wurde, waren, vor der Füllung mit Quecksilber, mit destilliertem Wasser befeuchtet worden. Der Einfluß der Temperatur und des Barometerstands wurden ebenfalls gehörig berücksichtigt. Die Beobachtungen wurden sämtlich gemeinschaftlich von Hrn. Prof. *Ulrich* und dem Unterzeichneten ausgeführt.

Was endlich das gewonnene Resultat selbst betrifft, so darf die Harmonie der fünf Messungen untereinander als eine neue Bestätigung des *Faraday*schen Satzes betrachtet werden, daß zur Zersetzung derselben Menge Wasser immer gleiche Menge Elektrizität gebraucht wird. Wenn es die Verhältnisse künftig gestatten, werden, um jene Bestätigung noch schlagender zu machen, diese Messungen unter noch mehr abgeänderten Verhältnissen wiederholt werden. Auch werden ähnliche Messungen bei andern Körpern statt des Wassers, z. B. bei der Salzsäure ausgeführt werden.

Vergleicht man endlich das Resultat dieser Messungen mit denen des vorigen Aufsatzes über das Maximum der Stromintensität verschiedener Säulen, so erhält man, wie dort schon angeführt wurde, eine Kenntnis von der Geschwindigkeit der

---

*) [Das Ergebnis stimmt mit der jetzt angenommenen Zahl 0,00933 in Anbetracht der erschwerenden Umstände bei der obigen Messung vorzüglich überein. *F. K.*]

Wasserzersetzung, welche mit dem galvanischen Strome unter besonders günstigen Verhältnissen erreicht werden kann, wonach zu beurteilen ist, ob der galvanische Strom zur Darstellung von Sauerstoff- und Wasserstoffgas mit Vorteil in praktische Anwendung gebracht werden könne. Daß das gewonnene Resultat endlich bei den mit *Faradays* [**98**] Volta-Elektrometer gemachten Versuchen eine nützliche Anwendung findet, um die absoluten Elektrizitätsmengen dabei genauer zu bestimmen, und auf die magnetischen Wirkungen, welche dadurch hervorgebracht werden könnten, zu schließen, bedarf keiner weiteren Auseinandersetzung.



[10]

Über die Elektrizitätsmenge, welche bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt.

Von

Wilhelm Weber und **R. Kohlrausch.** *)

(Pogg. Ann. Band XCIX, Seite 10—25. 1856
und Abhandl. d. K. S. Ges. der Wissensch. V, 278—283. 1856.)

1. Aufgabe. **)

Die Vergleichung der Wirkungen einer geschlossenen galvanischen Kette mit den Wirkungen des Entladungsstromes angesammelter freier Elektrizität hat zu der Annahme geführt, daß diese Wirkungen von einer Elektrizitätsbewegung in der Kette herrühren. Wir denken uns in den die Kette konstituierenden Körpern ihre neutrale Elektrizität in Bewegung, in der Art, daß deren gesamter positiver Teil nach der einen Richtung sich in geschlossenem, zusammenhängendem Kreise herumschiebt, der negative nach der entgegengesetzten Richtung. Der Umstand, daß nirgends durch diese Bewegung eine Aufhäufung der Elektrizität entsteht, fordert die Annahme, daß durch jeden Querschnitt in gleicher Zeit die gleiche Elektrizitätsmenge hindurchfließe.

---

*) Der Herr Herausgeber wünschte für die Annalen einen Bericht über eine von Prof. *Weber* und mir gemeinschaftlich ausgeführte Arbeit, deren Resultate unter Prof. *Webers* wesentlicher [ein bescheidener Ausdruck des Verfassers, denn ein sehr großer Teil stammt aus seiner Feder *F. K.*] und schließlicher Redaktion im 5. Bande der Abhandlungen der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig unter dem Titel: Elektrodynamische Maßbestimmungen, insbesondere Zurückführung der Stromintensitätsmengen auf mechanisches Maß (Leipzig bei *S. Hirzel.* 1856) niedergelegt sind. Ich gebe hiermit einen kurzen Auszug. *R. Kohlrausch.*

**) [Der Leser wolle im Auge behalten, daß auch in diesem Aufsatze den Messungen überall das [Mm, Mg, Sec]-System zugrunde liegt. *F. K.*]

Man hat sich darüber geeinigt, daß man die Größe dieses Fließens, die sogenannte Stromintensität, proportional setzen will der Elektrizitätsmenge, welche in derselben Zeit durch den Querschnitt der Kette hindurchgeht. Soll also eine bestimmte Stromintensität durch eine Zahl ausgedrückt werden, so ist festzusetzen, welche [11] Stromintensität zum Maße dienen soll, d. h. welche Größe des Fließens man mit Eins bezeichnen will.

Am einfachsten wäre es hier, wie überhaupt bei einem jeden Fließen, diejenige Größe des Fließens mit Eins zu bezeichnen, welche entsteht, wenn in der Zeiteinheit die Einheit der Flüssigkeit durch den Querschnitt geht, also das Maß der Stromintensität aus ihrer Ursache zu definieren. Die Einheit des elektrischen Fluidums ist in der Elektrostatik durch die Kraft bestimmt, mit welcher die freien Elektrizitäten in der Entfernung aufeinander wirken. Denkt man zwei gleiche Mengen von Elektrizität derselben Art in zwei Punkten konzentriert, deren Entfernung die Längeneinheit ist, und ist dann die Kraft, mit welcher sie abstoßend aufeinander wirken, gleich der Krafteinheit, so ist die in jedem der beiden Punkte befindliche Elektrizitätsmenge das Maß oder die Einheit der freien Elektrizität.

Als Krafteinheit wird dabei diejenige Kraft angenommen, durch welche die Masseneinheit während der Zeiteinheit um die Längeneinheit beschleunigt wird. Dadurch also, daß die Einheiten für die Länge, Zeit und Masse festgesetzt werden, ist nach den Prinzipien der Mechanik zugleich das Maß für die Kräfte gegeben, und indem wir an letzteres das Maß für die freie Elektrizität anknüpfen, haben wir gleichzeitig ein Maß für die Stromintensität.

Dieses Maß, welches das mechanische Maß der Stromintensität heißen soll, setzt also die Intensität desjenigen Stromes zur Einheit, welcher entsteht, wenn in der Zeiteinheit die Einheit der freien positiven Elektrizität in der einen Richtung, eine gleiche Menge negativer Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung durch jeden Querschnitt der Kette fließt.*)

*) [Allgemein wird jetzt die Hälfte der oben definierten Stromeinheit als Einheit genommen, nämlich der Strom, bei welchem die Summe beider in der Zeiteinheit durch einen Querschnitt fließenden Elektrizitätsmengen gleich Eins ist. *F. K.*]

Nach diesem Maße können wir nun die Messung der Intensität eines vorhandenen Stromes nicht ausführen, denn wir kennen weder die Menge des neutralen elektrischen Fluidums, welche in der Kubikeinheit des Leiters vorhanden ist, noch kennen wir die Geschwindigkeit, mit welcher [12] sich die beiden Elektrizitäten bei dem Strome verschieben. Wir können die Intensität der Ströme nur durch die Wirkungen vergleichen, welche sie hervorbringen.

Eine dieser Wirkungen ist z. B. die Wasserzersetzung. Es kommen hinreichende Gründe zusammen, die Stromintensität der Wassermenge proportional zu setzen, welche in derselben Zeit zerlegt wird. Danach würde man diejenige Stromintensität mit Eins bezeichnen, bei welcher in der Zeiteinheit die Masseneinheit Wasser zerlegt wird, also z. B., wenn die Sekunde und das Milligramm als die Maße der Zeit und der Masse angenommen werden, diejenige Stromintensität, bei welcher in einer Sekunde ein Milligramm Wasser zersetzt wird. Dieses Stromintensitätsmaß heißt das elektrolytische.

Nun entsteht die natürliche Frage, wie sich dieses elektrolytische Maß der Stromintensität zu dem vorhin festgesetzten mechanischen Maße verhalte, also die Frage, wie viele (elektrostatisch oder mechanisch gemessene) positive Elektrizitätseinheiten in der Richtung des positiven Stromes während der Sekunde durch den Querschnitt fließen, wenn dabei in dieser Zeit ein Milligramm Wasser zerlegt wird.

Eine andere Wirkung des Stromes ist das Drehungsmoment, welches er auf eine Magnetnadel ausübt, und von dem wir ebenfalls voraussetzen, daß es unter sonst gleichen Umständen der Stromintensität proportional sei. Soll durch diese Art Wirkung eine Stromintensität gemessen werden, so sind die Verhältnisse festzusetzen, unter denen das Drehungsmoment beobachtet werden soll. Man könnte diejenige Stromintensität mit Eins bezeichnen, welche unter beliebig festgesetzten räumlichen Verhältnissen ein beliebig festgesetztes Drehungsmoment auf einen beliebig gewählten Magneten ausübt. Wenn dann unter denselben Verhältnissen ein m mal so großes Drehungsmoment beobachtet würde, so müßte die dabei herrschende Stromintensität mit m bezeichnet werden. Das Unpraktische solcher willkürlichen Maße hat aber eben zu den absoluten [13] Maßen geführt, und so ist in diesem Falle das elektromagnetische Maß der Stromintensität an das

absolute Maß für den Magnetismus anzuknüpfen. Das geschieht durch folgende Festsetzung der Normalverhältnisse für die Beobachtungen der magnetischen Wirkungen eines Stromes:

Der Strom geht durch einen kreisförmigen Leiter, welcher die Flächeneinheit umschließt, und wirkt auf einen Magnet, welcher die Einheit des Magnetismus besitzt, aus einer beliebigen aber großen Entfernung $= R$; der Mittelpunkt des Magnets liegt in der Ebene des Leiters, und seine magnetische Achse ist nach dem Mittelpunkte des kreisförmigen Leiters gerichtet.*) — Das von dem Strome auf den Magnet ausgeübte, nach mechanischem Maße ausgedrückte Drehungsmoment D ist unter diesen Verhältnissen verschieden sowohl nach Verschiedenheit der Stromintensität, als auch nach Verschiedenheit der Entfernung R; das Produkt $R^3 D$ hängt aber bloß von der Stromintensität ab und ist daher unter diesen Verhältnissen die meßbare Wirkung des Stroms, nämlich dasjenige, wodurch die Stromintensität zu messen ist, wonach man also zum magnetischen Maße der Stromintensität die Intensität desjenigen Stromes erhält, für welchen $R^3 D = 1$ ist.**) — Die elektromagnetischen Gesetze lehren, daß dieses Maß der Stromintensität zugleich die Intensität desjenigen Stromes ist, welcher, wenn er eine Ebene von der Größe der Flächeneinheit umschließt, in der Ferne überall die Wirkungen eines im Mittelpunkte jener Ebene befindlichen Magnets ausübt, welcher die Einheit des Magnetismus besitzt, und dessen magnetische Achse auf der Ebene senkrecht steht; — oder auch, daß es die Intensität desjenigen Stromes ist, von welchem eine Tangentenbussole mit einfachem Ringe vom Halbmesser $= R$ bei einer Ablenkung vom magnetischen Meridiane

$$\varphi = \text{arc tg} \frac{2\pi}{RT}$$

im Gleichgewichte gehalten wird, wenn T die horizontale Intensität des Erdmagnetismus bezeichnet.

---

*) [D. h. sogenannte zweite *Gauß*sche Hauptlage. *F. K.*]

**) [Diese Darstellung ist wohl die logischste; übersichtlicher aber wird der kurze, mit ihr identische Ausdruck sein: der Strom i bewirkt in der beschriebenen Weise, im Abstande R das magnetische Feld $\frac{i}{R^3}$. *F. K.*]

Auch hier entsteht die natürliche Frage über das Verhältnis [14] des mechanischen Maßes der Stromintensität zu diesem magnetischen Maße, also die Frage, wievielmal die elektrostatische Einheit der Elektrizitätsmenge während einer Sekunde durch den Querschnitt der Kette hindurchgehen müsse, um diejenige Stromintensität hervorzubringen, von welcher die eben genannte Ablenkung φ der Nadel einer Tangentenbussole bewirkt wird.

Dieselbe Frage wiederholt sich bei der Betrachtung eines dritten Stromintensitätsmaßes, welches den elektrodynamischen Wirkungen der Ströme entnommen ist und deswegen das elektrodynamische Maß der Stromintensität heißt.*)

Nun sind die drei von der Wirkung der Ströme hergenommenen Maße schon untereinander verglichen. Man weiß, daß das magnetische Maß $\sqrt{2}$ mal größer ist als das elektrodynamische, aber $106\frac{2}{3}$ mal kleiner als das elektrolytische,**) und es ist deswegen, um die Frage zu lösen, wie diese drei Maße sich zum mechanischen Maße verhalten, nur nötig, das letztere mit einem der übrigen zu vergleichen.

Dieses war der Zweck der unternommenen Arbeit, welcher zu erreichen war durch die Lösung der folgenden

Aufgabe:

Es sei ein konstanter Strom gegeben, von welchem eine Tangentenbussole mit einfachem Multiplikatorkreise vom Halbmesser $= R^{\text{mm}}$ bei einer Ablenkung $\varphi = \text{arc tang}\,\frac{2\pi}{RT}$ im Gleichgewichte erhalten wird, wenn T die Intensität des die Bussole lenkenden horizontalen Erdmagnetismus bezeichnet: es soll bestimmt werden, wie die Elektrizitätsmenge, welche bei einem solchen Strome in einer Sekunde

---

*) [Diese dritte Stromeinheit, von der gegenwärtig kaum noch gesprochen wird, fällt bekanntlich, wie in der ausführlichen Abhandlung auch hervorgehoben wird, mit der elektromagnetischen Stromeinheit zusammen, sobald man den von *Ampère* gegebenen Ausdruck für die elektrodynamische Wirkung zweier Stromelemente mit 2 multipliziert. *F. K.*]

**) [Die Zahl $106\frac{2}{3}$ ist der reziproke Wert des im vorigen Aufsatze von *Weber* bestimmten elektrochemischen Äquivalents 0,009 376 des Wassers. *F. K.*]

durch den Querschnitt fließt, sich zu der Elektrizitätsmenge auf jeder von zwei gleich geladenen (unendlich) kleinen Kugeln verhält, welche einander aus der Entfernung von 1 mm mit der Einheit der Kraft abstoßen. Es soll dabei zur Einheit der Kraft diejenige Kraft genommen werden, [15] welche der Masse eines Milligramms in einer Sekunde 1 mm Geschwindigkeit erteilt.

2. Lösung dieser Aufgabe.

Hat man auf einem isolierten Leiter eine Menge E von freier Elektrizität angesammelt und läßt (unter Einschaltung einer Wassersäule) dieselbe durch einen Multiplikator nach der Erde strömen, so wird die Magnetnadel abgelenkt. Die Größe der ersten Elongation hängt bei demselben Multiplikator und derselben Nadel lediglich von der Menge der entladenen Elektrizität ab, indem die Entladungszeit so kurz gegen die Schwingungsdauer der Nadel ist, daß die Wirkung als ein Stoß betrachtet werden darf.

Wenn man einen konstanten Strom eine ähnliche kurze Zeit durch einen Multiplikator leitet, so erteilt man der Nadel einen ähnlichen Stoß, und auch in diesem Falle hängt die Größe der ersten Elongation lediglich von der Elektrizitätsmenge ab, welche während der Dauer des Stromes durch den Querschnitt des Multiplikatordrahtes sich bewegt.

Wäre nun bei demselben Multiplikator genau dieselbe Elongation entstanden, das eine Mal, indem man die bekannte Menge E von freier Elektrizität entlud, das andere Mal, indem man einen konstanten Strom eine kurze Zeit wirken ließ, so ist, wie sich beweisen läßt, die Menge positiver Elektrizität, welche während dieser kurzen Zeit bei dem konstanten Strome in der Richtung dieses Stromes durch den Querschnitt floß, gleich $\frac{1}{2}E$.

Hiernach fordert die gestellte Aufgabe die Lösung folgender zwei Aufgaben:

a) eine angesammelte Menge E von freier Elektrizität in dem angegebenen elektrostatischen Maße zu messen und bei ihrer Entladung die Elongation der Magnetnadel eines Galvanometers zu beobachten;

b) die kleine Zeit τ zu bestimmen, während welcher ein konstanter Strom von der Intensität $= 1$ (nach

magnetischem Maße) durch den Multiplikator desselben Galvanometers [16] fließen muß, damit er der Nadel dieselbe Elongation erteile.

Multipliziert man dann $\frac{1}{2}E$ mit der Zahl, welche anzeigt, wie oft τ in der Sekunde enthalten ist, so erhält man in der entstehenden Zahl $\frac{E}{2\tau}$ die positive Elektrizitätsmenge ausgedrückt, welche bei einem Strom, dessen Intensität nach magnetischem Maße = 1 ist, während der Sekunde in der Richtung des positiven Stromes den Querschnitt des Leiters passiert.

Die Aufgabe a) wurde in folgender Weise behandelt.

Es wurde zuerst mit Hilfe des Sinuselektrometers das Verhältnis [4]) mit großer Genauigkeit bestimmt, in welchem sich die Ladung einer kleinen Leidener Flasche zwischen ihr selbst und einer etwa 13zölligen, mit Stanniol bekleideten Kugel teilte, welche entfernt von den Wandungen des Zimmers gut isoliert aufgehängt war, so daß aus der auf die Kugel übergegangenen Elektrizitätsmenge, sobald man diese zu messen verstand, auch die in der kleinen Flasche zurückgebliebene Menge bis auf einen Teil eines Prozentes berechnet werden konnte.

Die Beobachtungen bestanden darauf in Folgendem:

Die Flasche wurde geladen, die große Kugel mit ihrem Knopfe berührt, drei Sekunden später die in der Flasche zurückgebliebene Ladung durch einen aus 5635 Windungen gebildeten Multiplikator*) unter Einschaltung von zwei mit Wasser gefüllten langen Röhren entladen und die erste Elongation φ der mit einem Spiegel nach Art der Magnetometer versehenen Magnetnadel beobachtet. Zugleich wurde jetzt die große Kugel mit der ungefähr 1zölligen Standkugel einer in sehr großem Maßstabe ausgeführten Torsionswage**) berührt.

---

*) Der mittlere Durchmesser der Windungen betrug 266 mm; der fast $\frac{2}{3}$ Meilen lange und sehr gut mit Seide besponnene Draht war vorher seiner ganzen Länge nach durch Kollodium gezogen, während die Wandungen des Gehäuses stark mit Siegellack bekleidet waren. Ein kräftiger Kupferdämpfer beruhigte die Schwingungen.

**) Der Kasten der Torsionswage, in dessen Mitte die Kugeln sich befanden, war parallelepipedisch, 1,16 m lang, 0,81 m breit und 1,44 m hoch. Die lange Schellackstange, an welcher durch einen seitlichen Schellackarm die bewegliche Kugel befestigt war, trug zur Beobachtung der Stellung der Kugel unten einen Spiegel und tauchte dann in ein Gefäß mit Öl, wodurch die Schwankungen sehr rasch beseitigt wurden.

Diese Standkugel, in die [17] Torsionswage gebracht, halbierte ihre empfangene Ladung mit der beweglichen Kugel, worauf sich die Torsion messen ließ, welche während einer längeren Zeit in abnehmendem Maße erforderlich war, um die beiden Kugeln in einer ganz bestimmten, vorher ausgemittelten Entfernung zu erhalten. — Aus dem durch Schwingungsversuche in bekannter Weise ermittelten Torsionskoeffizienten des Drahtes und den genau bestimmten Dimensionen konnte unter Berücksichtigung der nicht gleichförmigen Verteilung der Elektrizität auf den beiden Kugeln (welche Rücksichtnahme durch die gegen ihre Entfernung voneinander nicht unbedeutende Größe der Kugeln geboten wurde), die Elektrizitätsmenge in dem geforderten absoluten Maße gemessen werden, welche in jedem Augenblicke in der Torsionswage sich befand. Durch die beobachtete Abnahme der Torsion ergab sich zugleich der Elektrizitätsverlust, so daß es möglich wurde, durch dessen Berücksichtigung ebenfalls anzugeben, wie groß diese Menge gewesen wäre, wenn sie in dem Augenblicke schon in der Torsionswage sich hätte befinden können, in welchem die große Kugel von der Leidener Flasche geladen wurde. — Diese Menge war also von der großen Kugel auf die Standkugel übergegangen. Aus den genau gemessenen Halbmessern dieser Kugeln konnte (nach *Planas* Arbeiten) das Verhältnis der Teilung der Elektrizität zwischen ihnen berechnet werden, so daß durch die Abmessung in der Torsionswage ohne weiteres die Elektrizitätsmenge bekannt wurde, welche nach Ladung der großen Kugel in der Leidener Flasche zurückgeblieben und 3 Sekunden später durch den Multiplikator entladen war. Sie bedurfte nur noch einer kleinen Korrektion wegen des Verlustes an disponibler Ladung, [18] welcher während dieser 3 Sekunden durch Ausströmen an die Luft und durch Rückstandsbildung entstanden war. [5])

In der folgenden Tabelle sind die Resultate von fünf aufeinander folgenden Versuchen zusammengestellt. Die mit E überschriebene Kolumne enthält die entladenen Elektrizitätsmengen, die mit s überschriebene die entsprechenden Ablenkungen der Magnetnadel in Skalenteilen, und die mit φ überschriebene dieselben Ablenkungen, aber in Bogen für den Radius $= 1$.

Nr.	E	s	φ
1	36060000	73,5	0,0057087
2	41940000	80,0	0,0062136
3	49700000	96,5	0,0074952
4	44350000	91,1	0,0070757
5	49660000	97,8	0,0075962

Die Aufgabe b) verlangt die Zeiten τ zu wissen, während welcher ein Strom von derjenigen Intensität, welche im magnetischen Strommaße mit 1 bezeichnet wird, durch denselben Multiplikator fließen muß, um die in den fünf Versuchen beobachteten Elongationen φ hervorzubringen.

Es ist in dem »zweiten Teile der elektrodynamischen Maßbestimmungen von *W. Weber*« das Drehungsmoment entwickelt, welches von dem eben bezeichneten Strome auf eine Magnetnadel ausgeübt wird, welche den Windungen des Multiplikators parallel steht. Dieses Drehungsmoment ist proportional dem magnetischen Momente der Nadel und der Zahl der Windungen, außerdem aber eine Funktion der Dimensionen des Multiplikators und der Verteilung der magnetischen Fluida in der Nadel, wofür es genügt, den Abstand der Schwerpunkte der beiden magnetischen Fluida zu bestimmen, welche statt der wirklichen Verteilung des Magnetismus auf der Oberfläche der Nadel verteilt gedacht werden können. Bei der gegen den Durchmesser des Multiplikators immer noch kleinen Nadel[6]) konnte für diesen Abstand ein aus der Gestalt der Nadel entnommener Wert mit hinreichender Sicherheit gesetzt werden, so [19] daß das bezeichnete Drehungsmoment D als unbekannt nur noch das magnetische Moment der Nadel enthielt. — Wenn dieses Drehungsmoment während einer gegen die Schwingungsdauer t der Nadel sehr kurzen Zeit τ wirkt, so findet man die dadurch der Nadel erteilte angulare Geschwindigkeit in dem Ausdrucke

$$\frac{D}{K}\tau,$$

wobei K das Trägheitsmoment bedeutet. Die Beziehung zwischen dieser angularen Geschwindigkeit und der ersten Elongation φ führt dann zu einer Gleichung zwischen τ und φ,

$$\tau = \varphi \cdot A,$$

worin A eine aus lauter scharf zu messenden Grössen zusammengesetzte, also bekannte Konstante bedeutet, nämlich $A = 0{,}020915$ für die Sekunde als Zeitmaß.[7])

Fragt es sich also, während welcher Zeiten τ ein konstanter Strom von der magnetischen Stromintensität $= 1$ durch den Multiplikator fließen mußte, um die obigen fünf beobachteten Elongationen hervorzubringen, so braucht man deren Werte nur in diese Gleichung für τ einzusetzen. Auf diese Weise ergeben sich in Sekunden die Werte

Nr.	τ
1	0,0001194
2	0,0001300
3	0,0001568
4	0,0001480
5	0,0001589

Dividiert man nun $\frac{1}{2}E$ in den fünf Versuchen durch das zugehörige τ, so findet sich

Nr.	$\frac{E}{2\tau}$
1	$151000 \cdot 10^6$
2	$161300 \cdot 10^6$
3	$158500 \cdot 10^6$
4	$149800 \cdot 10^6$
5	$156250 \cdot 10^6$

[20] also im Mittel[8])

$$\frac{E}{2\tau} = 155\,370 \cdot 10^6.$$

Das mechanische Maß der Stromintensität verhält sich also

zum magnetischen $1 : 155370 \cdot 10^6$,

zum elektrodynamischen wie $1 : 109860 \cdot 10^6$
$(= 1 : 155370 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\tfrac{1}{2}})$,

zum elektrolytischen wie $1 : 16573 \cdot 10^9$
$(= 1 : 155370 \cdot 10^6 \cdot 106\tfrac{2}{3})$.

3. Anwendungen.

a) Die Konstante des Weberschen Gesetzes.

Unter den Anwendungen, welche von der Zurückführung der gebräuchlichen Maße für die Stromintensität auf mechanisches Maß gemacht werden können, ist die wichtigste die Bestimmung der Konstanten, welche in dem elektrischen Grundgesetz vorkommt, durch welches die Elektrostatik, Elektrodynamik und Induktion zugleich umfaßt werden. Nach diesem Grundgesetz ist die Wirkung der Elektrizitätsmenge e auf die Menge e' in der Entfernung r bei der relativen Geschwindigkeit $\frac{dr}{dt}$ und der relativen Beschleunigung $\frac{d^2r}{dt^2}$ gleich

$$\frac{ee'}{rr}\left[1 - \frac{1}{cc}\left(\frac{dr^2}{dt^2} - 2r\frac{d^2r}{dt^2}\right)\right],$$

und die Konstante c stellt dabei diejenige relative Geschwindigkeit vor, welche die elektrischen Massen e und e' haben und behalten müssen, wenn sie gar nicht mehr aufeinander wirken sollen.

Im Vorigen ist das Verhältnis des magnetischen Maßes zum mechanischen gefunden worden

$$= 155\,370 \cdot 10^6 : 1;$$

in der zweiten Abhandlung über elektrische Maßbestimmungen ist dasselbe Verhältnis gefunden

$$= c\sqrt{2} : 4;$$

die Gleichstellung dieser Verhältnisse liefert

$$c = 439\,450 \cdot 10^6 \tag{21}$$

Längeneinheiten, nämlich Millimeter, also eine Geschwindigkeit von 59 320 Meilen in der Sekunde.

Die Einsetzung des Wertes von c in das obige elektrische Grundgesetz läßt begreifen, warum die elektrodynamische Wirkung elektrischer Massen, nämlich

$$\frac{ee'}{rr}\,\frac{1}{cc}\left(\frac{dr^2}{dt^2} - 2r\frac{d^2r}{dt^2}\right)$$

gegen die elektrostatische

$$\frac{ee'}{rr}$$

immer verschwindend klein erscheint, so daß die erstere überhaupt nur bemerkbar bleibt, wenn, wie beim galvanischen Strome, die elektrostatischen Kräfte durch die Neutralisation der positiven und negativen Elektrizität sich vollkommen aufheben.

b) Die Elektrolyse.[9])

Es ist oben angegeben, daß bei einem Strome, der in der Sekunde 1 mg Wasser zersetzt,

$$106\tfrac{2}{3} \cdot 155\,370 \cdot 10^6$$

positive Elektrizitätseinheiten in der Richtung des positiven Stromes in jeder Sekunde durch den Querschnitt der Kette gehen und dieselbe Menge an negativer Elektrizität in der entgegengesetzten Richtung.

Der Umstand, daß bei der Elektrolyse ponderable Massen bewegt werden, daß diese Bewegung durch elektrische Kräfte hervorgebracht wird, welche nur wieder auf Elektrizität, nicht unmittelbar auf das Wasser wirken, führt zu der Vorstellung, daß im Wasseratom das Wasserstoffatom freie positive, das Sauerstoffatom freie negative Elektrizität besitze. Es kommen mancherlei Gründe zusammen, weshalb man eine Elektrizitätsbewegung im Wasser nicht ohne Elektrolyse denken will, und weshalb man annimmt, daß das Wasser nicht imstande sei, die Elektrizität nach Art der Leiter durch sich hindurch strömen zu lassen. Sieht man also an der einen Elektrode eben so viele positive [**22**] Elektrizität aus dem Wasser auftreten, wie der andern Elektrode während derselben Zeit durch den Strom zugeführt wird, so ist diese auftretende positive Elektrizität diejenige, welche den ausgeschiedenen Wasserstoffteilchen angehört hat.

Stellt man sich auf diesen Standpunkt, so daß man also die ganze Elektrizitätsbewegung im Elektrolyten an die Bewegung der ponderablen Atome knüpft, so geht zunächst aus den oben gewonnenen Zahlen hervor, daß die Wasserstoffatome in 1 mg Wasser $106\frac{2}{3} \cdot 155\,370 \cdot 10^6$ Einheiten an freier positiver Elektrizität besitzen, die Sauerstoffatome eine gleiche Menge an negativer Elektrizität.

Daraus folgt zweitens, daß diese Elektrizitätsmengen zusammen das Minimum von neutraler Elektrizität bezeichnen, welche in einem Milligramm Wasser enthalten ist.

Würden nämlich die Atome des Wassers außer ihrer freien Elektrizitäten noch neutrale Elektrizität besitzen, was hier dahingestellt bleiben mag, so würde die Masse der neutralen Elektrizität in einem Milligramm Wasser noch größer sein.

Man ist unter den obigen Voraussetzungen aber auch imstande, die Kraft anzugeben, mit welcher auf die Gesamtheit der Wasserstoffteilchen einer Wassermasse in der einen Richtung, auf die Gesamtheit der Sauerstoffteilchen in der entgegengesetzten Richtung gewirkt wird.

Man denke sich z. B. eine cylindrische Röhre von $\frac{10}{9}$ qmm Querschnitt, welche als Zersetzungszelle dienen soll, mit einem Gemische von Wasser und Schwefelsäure vom spezifischen Gewichte 1,25 angefüllt, welche also[10]) in jedem 1 mm langen Stücke ein Milligramm Wasser enthält. Durch *Horsford* kennen wir das Verhältnis des spezifischen Widerstandes dieser Mischung zu dem des Silbers und durch *Lenz* das Verhältnis des Widerstandes des Silbers zu dem des Kupfers. In den Abhandlungen der K. Gesellschaft der Wissenschaften in Göttingen (Bd. 5 »über die Anwendung der magnetischen Induktion auf Messung der Inclination mit dem Magnetometer«) ist der [**23**] Widerstand des Kupfers nach absolutem Maße des magnetischen Systems bestimmt. Dadurch wird es möglich, auch den Widerstand in absolutem magnetischem Maße anzugeben, welchen das Wasser (unter Einfluss der beigemengten Schwefelsäure) in einem 1 mm langen Stücke jener cylinderförmigen Zersetzungszelle ausübt. Dieser Widerstand, multipliziert mit der in magnetischem Maße ausgedrückten Stromintensität, gibt die elektromotorische Kraft in Beziehung auf diese kleine Säule, ebenfalls im magnetischen Maßsystem. Das magnetische Maß der elektromotorischen Kraft ist aber sovielmal kleiner als das mechanische, wie das magnetische Maß der Stromintensität größer ist als das mechanische, und da dies letztere Verhältnis jetzt bekannt ist, kann durch bloße Division mit $155\,370 \cdot 10^6$ jene im magnetischen Maße berechnete elektromotorische Kraft in mechanisches Maß umgewandelt werden. Die so entstandene Zahl bedeutet dann den Unterschied der beiden Kräfte, von denen in der Richtung des Stromes die eine auf eine jede Einheit der freien positiven Elektrizität in den Wasserstoffteilchen, die andere auf eine jede Einheit der freien negativen Elektrizität in den Sauerstoffteilchen bewegend wirkt, und diese Zahl muß deswegen, um die ganze wirksame Kraft zu erhalten, noch mit der Anzahl der

Einheiten der freien positiven oder negativen Elektrizität multipliziert werden, welche in der 1 mm langen Wassersäule, d. i. in 1 mg Wasser, enthalten ist, nämlich mit $106\frac{2}{3} \cdot 155370 \cdot 10^6$.

Führt man die Rechnung durch und setzt diejenige Stromintensität voraus, bei welcher in einer Sekunde 1 mg Wasser zersetzt wird, so bekommt man einen Kraftunterschied

$$= 2 \cdot (106\tfrac{2}{3})^2 \cdot 127476 \cdot 10^6,$$

bei dem die Krafteinheit diejenige Kraft ist, welche der Masseneinheit von 1 mg in einer Sekunde eine Geschwindigkeit von 1 mm erteilt. Dividiert man also mit der Intensität der Schwere $= 9811$, so bekommt man diesen Kraftunterschied in Gewicht ausgedrückt

[**24**] $= 2 \cdot 147830 \cdot 10^6\,\text{mg} = 2 \cdot 147830\,\text{kg} = 2 \cdot 2956$ Zentner

unter dem Einflusse der Schwere.

Man kann dieses Resultat auf folgende Weise aussprechen: Wären alle Teilchen Wasserstoff in 1 mg Wasser einer 1 mm langen Säule an einen Faden geknüpft, und an einen andern Faden alle Teilchen Sauerstoff, so müßten beide Fäden in entgegengesetzten Richtungen jeder mit dem Gewichte von 2956 Zentnern gespannt werden, um eine Zersetzung des Wassers mit solcher Geschwindigkeit hervorzubringen, nach welcher 1 mg Wasser in der Sekunde zerlegt werden würde.

Man überzeugt sich leicht, daß diese Spannung dieselbe bleibt für eine Säule von 1 mm Länge aber anderem Querschnitt, daß sie aber proportional der Länge der Säule und ebenso proportional der Stromintensität, d. h. der Geschwindigkeit der elektrolytischen Scheidung sein muß.

Wenn wir nun in der beschriebenen Wassersäule auf den Wasserstoffteilchen insgesamt einen Druck von dem Gewichte von 2956 Zentnern sehen, und wenn dadurch keine Beschleunigung der Bewegung eintritt, welche doch 1759 Millionen Meilen in der Sekunde betragen müßte, sondern der Wasserstoff mit der konstanten Geschwindigkeit von $\frac{1}{2}$ mm in der Sekunde fortschreitet, so sind wir gezwungen, anzunehmen, daß der Zerlegung des Wassers eine Kraft entgegen wirke, welche mit der Geschwindigkeit der Zerlegung wächst, so daß überhaupt nur diejenige Geschwindigkeit der Zerlegung möglich bleibt, bei welcher die Widerstandskraft gleich der elektromotorischen Kraft ist, so daß ihre Wirkung auf die gesamten

Wasserstoffteilchen des Milligramms Wasser in dem vorliegenden Falle ebenfalls dem Gewichte von 2956 Zentnern gleich wäre. Dann nämlich würden die ponderablen Teilchen mit der gewonnenen Geschwindigkeit gleichförmig fortfließen.

Es liegt nahe, den Grund dieser Widerstandskraft in den chemischen Affinitätskräften zu suchen. Steht auch der Begriff der »chemischen Affinität« noch zu unbestimmt da, [25] um daraus entnehmen zu können, wie die aus dieser Affinität hervorgehenden Kräfte mit der Geschwindigkeit der Scheidung wachsen, so ist es immerhin interessant, zu sehen, welche ungeheuren Kräfte bei einer chemischen Scheidung, wie sie von der Elektrolyse leicht hervorgebracht wird, in Wirksamkeit treten.

[278] c)*) Elektrizitätsgehalt der Leiter.[11])

Die Intensität des durch einen Leiter gehenden Stromes ist proportional der Geschwindigkeit, mit welcher die im Leiter enthaltene positive und negative Elektrizität durch den Querschnitt des Leiters fließt, und hängt daher von zwei Faktoren ab: 1) von der in jedem Längenelemente des Leiters enthaltenen Elektrizitätsmenge (welche die Kapazität des Leiters genannt werden kann), 2) von der Geschwindigkeit, mit welcher diese Elektrizitätsmenge (positive und negative nach entgegengesetzter Richtung) sich im Leiter fortbewegt. Läßt sich nun auch die Intensität des Stromes messen, das heißt die positive und negative Elektrizitätsmenge nach bekannten Maßen bestimmen, welche durch den Querschnitt des Leiters fließt, so läßt sich doch weder die in einem Längenelement des Leiters enthaltene Elektrizitätsmenge, noch die Geschwindigkeit, mit welcher sich dieselbe im Leiter fortbewegt, einzeln bestimmen: es würde dies nur in solchen Fällen geschehen können, wo die eine Elektrizität sich nicht allein bewegte, sondern die Leiterteilchen, in denen sie enthalten wäre, mit fortführte.

Ob nun dieser Fall beim Überspringen der Elektrizität von einem Konduktor zum andern (durch eine Luftschicht), wobei kleine Teilchen von dem einen Konduktor abgerissen und zum andern Konduktor hinübergeführt werden, stattfinde, ist zwar auf experimentellem Wege nicht ermittelt und wird sich auch

---

*) Die Abschnitte c) und d) stammen aus der Veröffentlichung in den Abhandl. d. K. S. Ges. d. Wissensch. V. S. 278—283, 1856.

nicht vollständig und sicher ermitteln lassen; doch scheint es unter gewissen Verhältnissen faktisch festzustehen, daß nur von dem positiv geladenen Konduktor kleine Teilchen abgerissen und zum negativen Konduktor hinüber geführt werden. Auch unterliegt es keinem Zweifel, daß diese kleinen abgerissenen Teilchen mit freier positiver Elektrizität geladen sind, und daß durch dieselben der Übergang einer bestimmten Elektrizitätsmenge von einem Konduktor zum andern vermittelt werde. Ob aber nur der Übergang eines Teils oder aller positiver Elektrizität von jenem Konduktor zu [**279**] diesem auf diese Weise vermittelt werde, ferner ob in diesen kleinen abgerissenen Teilchen bloß freie positive Elektrizität oder außerdem auch eine bestimmte Menge neutralen Fluidums enthalten sei, endlich wie sich dabei die negative Elektrizität des anderen Konduktors verhalte, ist bisher keiner näheren Erörterung unterworfen worden.

Was zunächst das Verhalten der Elektrizität des negativ geladenen Konduktors betrifft, von welcher unter den erwähnten Verhältnissen kein Teilchen abgerissen und zum positiven Konduktor geführt wird, so scheint daraus hervorzugehen, daß die negative Ladung dieses Konduktors unter jenen Verhältnissen irgend eine Verzögerung erlitten, und daß daher, ehe diese Ladung die zum Abreißen kleiner Teilchen erforderliche Stärke erreicht habe, die vom positiv geladenen Konduktor abgerissenen Teilchen schon zum negativen gelangen und durch Mitteilung ihrer positiven Ladung das Wachstum der negativen Ladung verhindern. Unter diesen Verhältnissen würde also gar keine Elektrizität vom negativ geladenen Konduktor zum positiv geladenen übergehen.

Was die andere Frage betrifft, ob die abgerissenen Teilchen bloß freie positive Elektrizität enthalten, oder ob sie außerdem eine bestimmte Quantität neutrales Fluidum mit sich führen, so läßt sich eine bestimmte Ansicht hierüber nur auf das Faktum der äußersten Feinheit der abgerissenen Teilchen begründen.

Es ist nämlich bekannt, daß, wenn eine größere und kleinere Kugel nach der Berührung getrennt werden, die in beiden enthaltene freie Elektrizität sich zwischen ihnen nach einem bestimmten Verhältnisse teilt, und zwar so, daß die mittlere Dicke der an der Oberfläche jeder Kugel befindlichen Elektrizitätsschicht nicht gleich, sondern daß die an der Oberfläche der kleineren Kugel größer ist, als die an der

Oberfläche der größeren, und zwar daß das Verhältnis sich dem Verhältnis

$$1{,}6449 : 1$$

desto mehr nähert, je ungleicher beide Kugeln sind.

Ein abgerissenes Teilchen kann nun als eine äußerst kleine Kugel betrachtet werden, und es wird daher, wenn man die Dicke der an der Oberfläche des positiv geladenen Konduktors vorhandenen Elektrizitätsschicht mit ε bezeichnet, die Dicke der an der Oberfläche des abgerissenen Teilchens vorhandenen $= 1{,}6449 \cdot \varepsilon$ zu setzen sein. Während nun bekanntlich bei dem positiv geladenen Konduktor ε gegen den Krümmungshalbmesser [**280**] seiner Oberfläche verschwindet, läßt sich keineswegs annehmen, daß auch $1{,}6449 \cdot \varepsilon$ gegen den Halbmesser des kleinen abgerissenen Teilchens verschwinde, im Gegenteil darf man bei der äußersten Kleinheit dieses Teilchen voraussetzen, daß sein Halbmesser kleiner oder wenigstens nicht grösser sei als $1{,}6449 \cdot \varepsilon$. Alsdann folgt aber, daß diese Schicht freier positiver Elektrizität das ganze Teilchen erfülle, und daß also kein von dieser Schicht eingeschlossener Raum vorhanden sei, der eine bestimmte Menge neutralen Fluidums enthielte. Die kleinen abgerissenen Teilchen würden also bloß freie positive Elektrizität enthalten.

Was endlich die Frage betrifft, ob von dem positiv geladenen Konduktor die freie Elektrizität nur von den abgerissenen Teilchen zum negativen Konduktor hinübergeführt werden, oder ob daneben eine andere Quantität positiver Elektrizität ohne ponderablen Träger sich selbst einen Weg zum negativ geladenen Konduktor bahne, so kann nur der Mangel alles physischen Grundes geltend gemacht werden, von dem es abhinge, daß der eine Teil der Elektrizität, unter ganz gleichen Verhältnissen, sich unabhängig von seinem ponderablen Träger bewegen sollte, während der andere seinen ponderablen Träger mit nachziehen müßte. Da es also von einem Teile der übergehenden Elektrizität faktisch feststeht, daß sie ihren ponderablen Träger mit fortzieht, so muß dasselbe von aller übergehenden Elektrizität so lange angenommen werden, bis das Gegenteil bewiesen wird.

Es würde hier also der Fall eines Stromes wirklich vorliegen, bei welchem sich die Leiterteilchen, welche nur positive Elektrizität enthalten, fortbewegen. Nun läßt sich nach den gewonnenen Maßbestimmungen die fortbewegte Elektrizitätsmenge, welche von dem einen Konduktor zum anderen übergegangen ist (durch Messung der Stromintensität) genau be-

stimmen; folglich bleibt nur übrig, auch die Menge der ponderablen Masse genau zu bestimmen, welche gleichzeitig von dem positiven Konduktor abgerissen und an den negativen Konduktor angesetzt worden ist. So klein diese ponderable Masse auch sein mag, so läßt sie sich doch deutlich beobachten, und es ist danach anzunehmen, daß auch ihr Gewicht mit den feinsten Wagen, die wir besitzen, sich werde bestimmen lassen.

Jedenfalls wird sich ergeben, daß selbst für sehr große Elektrizitätsmengen, welche vom positiv geladenen Konduktor zum negativ [**281**] geladenen übergehen, die ponderable Masse der mit fortgerissenen Leiterteilchen sehr klein sei, daß folglich die in jedem Längenelemente des Leiters enthaltene Elektrizitätsmenge außerordentlich groß sei. Je größer aber diese Elektrizitätsmenge ist, desto kleiner ist, bei gegebener Stromintensität, die Geschwindigkeit, mit welcher sich diese Elektrizitätsmenge im Leiter fortbewegt, und es darf daher diese geringe Geschwindigkeit, mit welcher sich die elektrischen Fluida in ihren Leitern bewegen, in keiner Weise mit der außerordentlich großen Geschwindigkeit verwechselt werden, mit welcher die Störung des Gleichgewichts der elektrischen Fluida durch metallische Leiter fortgepflanzt wird, auf welche die bekannten von *Wheatstone* gemachten Versuche sich beziehen.

Daß die in einem Längenelemente eines metallischen Leiters enthaltene Elektrizitätsmenge sehr groß, und die Geschwindigkeit, mit welcher sich diese Elektrizitätsmenge im Leiter bewegt, bei allen wirklich dargestellten Strömen sehr klein sei, ließ sich nach Analogie aus dem für feuchte Leiter (Wasser) gefundenen Resultate [vgl. oben S. 31] im voraus erwarten. Denn es ist dort gefunden worden, dass bei einem Strome, dessen Intensität nach elektrolytischem Maße = 1 ist, eine positive Elektrizitätsmenge von $106\frac{2}{3} \cdot 155\,370 \cdot 10^6$ Einheiten zusammen mit $\frac{1}{9}$ mg Wasserstoff in der einen Richtung, und eine gleich große negative Elektrizitätsmenge mit $\frac{8}{9}$ mg Sauerstoff verbunden in entgegengesetzter Richtung durch den Querschnitt des Leiters in 1 Sekunde geht, woraus folgt, daß in 1 mg Wasser $106\frac{2}{3} \cdot 155\,370 \cdot 10^6$ Einheiten positiver und negativer Elektrizität enthalten sein müsse, die sich aber (zusammen mit ihren ponderablen Trägern) nur mit der geringen Geschwindigkeit von $\frac{1}{2}$ mm in der Sekunde fortbewegen, wenn der Querschnitt des feuchten Leiters nur 1 qmm groß ist. Ist der Querschnitt größer, so ist die Geschwindigkeit nach Verhältnis noch kleiner.

d) Anwendung auf Maße.

Die in der Physik gebräuchlichen Maße werden in Grundmaße und abgeleitete Maße eingeteilt. In der allgemeinen Mechanik, wo alle Kräfte einzeln als gegeben betrachtet werden, lassen sich alle Maße auf die [**282**] drei bekannten Grundmaße für Raum, Zeit und Masse zurückführen. — In allen denjenigen Teilen der Physik, wo das Gravitationsgesetz vorausgesetzt werden darf, lassen sich alle Maße bloß auf die beiden Grundmaße für Raum und Zeit zurückführen, aus denen mit Hilfe des Gravitationsgesetzes auch das Maß der Masse abgeleitet wird. Man kann nämlich diejenige Masse zum Maße nehmen, welche, wenn sie in einem Punkte konzentriert wäre, auf eine andere Masse in der Einheit der Entfernung nach dem Gravitationsgesetze eine Kraft ausübt, die ihr in der Zeiteinheit eine Geschwindigkeit erteilt gleich der Längeneinheit in der Zeiteinheit.

Es ist nun interessant zu bemerken, daß auch dieses Maßsystem noch einer Vereinfachung fähig ist, und daß es möglich ist, alle in der Physik gebrauchten Maße aus dem einzigen Grundmaß für Raum abzuleiten, wenn man zwei Grundgesetze der Natur zu diesem Zwecke voraussetzen darf, nämlich außer dem Gravitationsgesetze ponderabeler Massen das Grundgesetz der elektrischen Wirkung. Denn mit Hilfe des letzteren kann auch das Maß der Zeit aus dem Raummaße abgeleitet werden. Man kann nämlich diejenige Zeit zum Maße nehmen, in welcher sich zwei mit gleichförmiger relativer Geschwindigkeit bewegte elektrische Massen um die Längeneinheit einander nähern oder voneinander entfernen müssen, wenn sie nach diesem Gesetze gar keine Wirkung aufeinander ausüben sollen.

Wählt man das Millimeter zum Raummaße, so würde unter Voraussetzung des Grundgesetzes der elektrischen Wirkung aus diesem Raummaß ein Zeitmaß abgeleitet werden, welches der

439450 millionste Teil einer Sekunde

wäre; denn wenn zwei mit gleichförmiger relativer Geschwindigkeit bewegte elektrische Massen in diesem kleinen Zeitraume um 1 mm sich einander nähern oder voneinander entfernen, so üben sie nach dem Grundgesetze der elektrischen Wirkung gar keine Wirkung aufeinander aus.

Nachdem auf diese Weise aus dem Raummaße das Zeitmaß abgeleitet worden ist, kann ferner aus diesen beiden Maßen unter Voraussetzung des Gravitationsgesetzes auch das Maß der Masse abgeleitet werden. Es ist nämlich nach dem Gravitationsgesetze die Erde eine Masse, welche, wenn sie in einem Punkte konzentriert wäre, einer anderen Masse in einer dem Erdhalbmesser gleichen Entfernung die [**283**] Beschleunigung $= 9811$ erteilt, wenn das Millimeter zum Raummaß und die Sekunde zum Zeitmaß gebraucht werden. Nimmt man nun statt der Sekunde das eben abgeleitete Zeitmaß, welches 439 450 Millionen mal kleiner ist, so ist das abgeleitete Beschleunigungsmaß $439\,450^2$ Billionen mal größer, und es ist nach diesem größeren Maße obige Beschleunigung

$$= \frac{9811}{439\,450^2 \cdot 10^{12}}.$$

Setzt man nun den Erdhalbmesser $= 6370 \cdot 10^6$ (Millimeter), so ergibt sich nach dem Gravitationsgesetze die Erde als eine Masse, welche, wenn sie in einem Punkte konzentriert wäre, einer andern Masse in der Einheit der Entfernung die Beschleunigung

$$= \frac{9811 \cdot 6370^2 \cdot 10^{12}}{439450^2 \cdot 10^{12}}$$

erteilt, folglich ist eine Masse, welche $\dfrac{439\,450^2}{9811 \cdot 6370^2}$ oder fast die Hälfte von der Erdmasse beträgt, diejenige Masse, welche nach dem Gravitationsgesetze, unter Annahme des Millimeters als Raummaßes und mit Hilfe des daraus schon abgeleiteten Zeitmaßes, als abgeleitetes Massenmaß erhalten wird.

Aus dem Millimeter als Raummaß und aus dem daraus eben abgeleiteten Zeit- und Massenmaße werden endlich alle übrigen in der Physik gebrauchten Maße auf bekannte Weise abgeleitet.

Nach diesem Systeme, wo alle Maße aus dem einzigen Grundmaße des Raumes abgeleitet werden, ist die Anziehungskraft zweier Massen m, m' in der Entfernung r gleich $\dfrac{mm'}{rr}$ und die Abstoßungskraft zweier Elektrizitätsmengen e, e' in der Entfernung r gleich $\dfrac{ee'}{rr}\left(1 - \dfrac{\mathrm{d}r^2}{\mathrm{d}t^2} + 2r\dfrac{\mathrm{d}^2r}{\mathrm{d}t^2}\right)$, ohne daß diesen Ausdrücken oder einzelnen Gliedern derselben konstante Faktoren beizufügen sind.

[337]

Messungen galvanischer Leitungswiderstände nach einem absoluten Maße.

Von

Wilhelm Weber.

(Pogg. Ann. Bd. LXXXII, S. 337—369, 1851.)

§ 1.

Erklärung der absoluten Maßeinheit für galvanische Leitungswiderstände.

Wie für die Geschwindigkeit kein eigenes Grundmaß aufgestellt zu werden braucht, wenn Raum- und Zeitmaß gegeben sind, so braucht auch kein eigenes Grundmaß für den galvanischen Leitungswiderstand aufgestellt zu werden, wenn Maße für die elektromotorische Kraft und für die Stromintensität gegeben sind. Man kann dann nämlich denjenigen Widerstand zur Maßeinheit nehmen, welchen ein geschlossener Leiter besitzt, in welchem die Maßeinheit der elektromotorischen Kraft die Maßeinheit der Stromintensität hervorbringt. Hierauf beruht die Zurückführung der Messungen galvanischer Leitungswiderstände auf ein absolutes Maß.

Man könnte glauben, daß sich diese Zurückführung noch einfacher ausführen ließe, wenn man auf die räumlichen Dimensionen (Länge und Querschnitt) der galvanischen Leiter zurückginge und sich dabei an dasjenige Metall hielte, welches zu solchen Leitern am geeignetsten ist und am häufigsten dazu gebraucht wird, an das Kupfer. Unter der absoluten Maßeinheit des Leitungswiderstandes würde dann derjenige Widerstand verstanden werden, welchen ein kupferner Leiter besitzt, dessen Länge dem Längenmaße, und dessen Querschnitt dem Flächenmaße gleich ist, wobei also, außer Längen- und Flächen-

maß, der [338] spezifische Leitungswiderstand des Kupfers als Maßeinheit für die spezifischen Widerstände leitender Stoffe gegeben sein müßte. Es wäre dazu also ein eigenes Grundmaß für spezifische Widerstände nötig, dessen Einführung Bedenken haben würde, erstens, weil dadurch keine Ersparnis in der Zahl der Grundmaße erlangt wird, wenn, um das Grundmaß für den absoluten Widerstand entbehrlich zu machen, ein anderes Grundmaß eingeführt werden muß, welches sonst entbehrlich wäre. Zweitens aber ist weder das Kupfer, noch ein anderes Metall ein geeigneter Stoff, um zur Feststellung eines Grundmaßes für spezifische Widerstände zu dienen. *Jacobi* sagt darüber, daß bei den Widerständen auch der chemisch reinsten Metalle Unterschiede stattfänden, welche durch eine Verschiedenheit der Dimensionen nicht erklärt werden könnten, und daß also, wenn der eine Physiker seine Widerstandsmesser und Multiplikatoren auf Kupferdraht von 1 m Länge und 1 mm Dicke bezöge, die anderen Physiker immer noch nicht die Überzeugung hätten, ob sein Kupferdraht und der ihrige einen gleichen Widerstandskoeffizienten besitze, d. h. ob der spezifische Widerstand des Kupfers von allen diesen Drähten gleich sei. Die Zurückführung der Messungen galvanischer Leitungswiderstände auf ein absolutes Maß kann daher nur dann eine wesentliche Bedeutung haben und praktische Anwendung finden, wenn sie auf die zuerst angegebene Weise geschieht, wobei keine anderen Maße als die für die elektromotorische Kraft und das für die Stromintensität vorausgesetzt werden.

Es fragt sich aber dann ferner, welche Maße für elektromotorische Kräfte und Stromintensitäten gegeben seien? Auch für die Messung dieser Größen brauchen keine eigenen Grundmaße aufgestellt zu werden, sondern sie können auf absolutes Maß zurückgeführt werden, wenn die magnetischen Maße für Stabmagnetismus und Erdmagnetismus und Raummaß und Zeitmaß gegeben sind.

Unter der absoluten Maßeinheit der elektromotorischen Kraft kann nämlich diejenige elektromotorische Kraft ver[339]standen werden, welche die Maßeinheit des Erdmagnetismus auf einen geschlossenen Leiter ausübt, wenn derselbe so gedreht wird, daß die von seiner Projektion auf eine gegen die Richtung des Erdmagnetismus senkrechte Ebene begrenzte Fläche während des Zeitmaßes um das Flächenmaß zunimmt

oder abnimmt. — Unter der absoluten Maßeinheit der Stromintensität kann die Intensität desjenigen Stromes verstanden werden, welcher, wenn er eine Ebene von der Größe des Flächenmaßes umläuft, die nämlichen Wirkungen nach den elektromagnetischen Gesetzen in die Ferne ausübt, wie ein Magnetstab, welcher die Maßeinheit des Stabmagnetismus enthält. — Die absoluten Maße des Stabmagnetismus und des Erdmagnetismus sind aus der Abhandlung von *Gauß: Intensitas vis magneticae terrestris ad mensuram absolutam revocata. Gottingae* 1833 (Ann. Bd. XXVIII, S. 241 und 591), bekannt.

Aus dieser Darstellung geht von selbst hervor, daß die Messungen galvanischer Leitungswiderstände auf ein absolutes Maß zurückgeführt werden können, wenn nur Raummaß, Zeitmaß und Massenmaß als Grundmaße gegeben sind; denn die zuletzt angeführten, von *Gauß* festgestellten absoluten Maße des Stabmagnetismus und des Erdmagnetismus hängen bekanntlich bloß von diesen drei Grundmaßen ab. Die nähere Betrachtung lehrt, daß selbst von diesen drei Grundmaßen das Massenmaß nicht in Betracht kommt, wie aus folgender Übersicht der einfachen Relationen hervorgeht, welche durch diese Feststellung absoluter Maße der hier betrachteten verschiedenen Größenarten begründet werden.

Als Grundmaße kommen dabei das Längenmaß R und das Zeitmaß S in Betracht; als absolute Maße das Flächenmaß F und die Maßeinheiten des Stabmagnetismus M, des Erdmagnetismus T, der elektromotorischen Kraft E, der Stromintensität J und des Leitungswiderstandes W.

Hiernach hat man erstens, wenn wW den Widerstand irgend eines geschlossenen Leiters, eE die elektromotorische Kraft, welche auf diesen Leiter wirkt, und iJ die In[**340**]tensität des durch diese elektromotorische Kraft hervorgebrachten Stromes ausdrückt, zwischen den drei Zahlen w, e, i die Relation:

$$w = \frac{e}{i},$$

woraus einleuchtet, daß, wenn die Zahlen e und i durch Messung bestimmt sind, mittelbar auch die Zahl w dadurch gefunden wird, ohne daß es dazu einer besonderen Messung bedarf.

Wenn zweitens eE die elektromotorische Kraft ausdrückt, welche auf irgend einen geschlossenen (ebenen) Leiter wirkt,

fF den Flächenraum der von diesem Leiter umschlossenen Ebene, tT den Erdmagnetismus, von welchem jene elektromotorische Kraft herrührt, und sS den Zeitraum, in welchem die Ebene jener Leiter durch Drehung aus einer mit der Richtung des Erdmagnetismus parallelen in eine darauf senkrechte Lage in solcher Weise übergeführt wird, daß die von seiner Projektion auf eine gegen diese Richtung des Erdmagnetismus senkrechte Ebene begrenzte Fläche, mit der Zeit proportional, während des Zeitmaßes um das Flächenmaß wächst; so hat man zwischen den vier Zahlen e, f, t, s folgende Relation:

$$e = \frac{ft}{s},$$

und hieraus leuchtet ein, daß wenn die drei Zahlen f, t, s durch Messung bestimmt sind, mittelbar auch die Zahl e dadurch gefunden wird, ohne daß es dazu einer besonderen Messung bedarf.

Wenn drittens iJ die Stromintensität in irgend einem geschlossenen (ebenen) Leiter ausdrückt, fF den Flächenraum der von diesem Leiter umschlossenen Ebene und mM den Magnetismus eines Stabes, welcher an die Stelle jenes Leiters gesetzt (seine magnetische Achse senkrecht gegen die Ebene des Leiters) dieselben Wirkungen nach elektromagnetischen Gesetzen in die Ferne ausübt, wie jener durchströmte Leiter; so hat man zwischen den drei Zahlen i, f, m folgende Relation:

[**341**]

$$i = \frac{m}{f},$$

woraus einleuchtet, daß wenn die Zahlen f und m durch Messung bestimmt sind, mittelbar auch die Zahl i dadurch gefunden wird, ohne daß es dazu einer besonderen Messung bedarf.

Aus diesen drei Relationen ergibt sich endlich

$$w = \frac{e}{i} = \frac{fft}{sm},$$

und hieraus folgt, daß wenn die vier Zahlen f, s, m, t durch Messung bestimmt sind, mittelbar auch die Zahl w dadurch gefunden wird. Die Zahl f wird durch Ausmessung des Flächenraumes der vom Leiter umschlossenen Ebene, die Zahl s durch Zeitmessung gefunden, und es bleiben also nur die Zahlen

m und t übrig, welche durch eine Messung des Stabmagnetismus nach der von *Gauß* in der angeführten Abhandlung gegebenen Vorschrift gefunden werden. Die Unveränderlichkeit der Maßeinheit für galvanische Leitungswiderstände kann hiernach sicher so lange verbürgt werden, als die vier gegebenen Maße: Flächenmaß, Zeitmaß und die Maßeinheiten für Stabmagnetismus und Erdmagnetismus unverändert erhalten werden; doch folgt daraus noch keineswegs, daß die Erhaltung dieser vier gegebenen Maße eine notwendige Bedingung für die Unveränderlichkeit der Maßeinheit galvanischer Leitungswiderstände sei, vielmehr reicht dazu schon die bloße Erhaltung derselben Maßeinheit für Geschwindigkeiten hin*).

Bezeichnet nämlich tT den Erdmagnetismus, von welchem die elektromotorische Kraft herrührt, welche auf den geschlossenen Leiter wirkt, dessen Widerstand gemessen worden ist, ferner $m'M$ den Magnetismus eines Stabes (dessen magnetische Achse der Richtung des Erdmagnetismus parallel sei, während die von seinem Mittelpunkte zum Mittelpunkte der vom Leiter umschlossenen Ebene gezogene Gerade gegen die Richtung des Erdmagnetismus senkrecht ist), welcher nach magnetischen Gesetzen aus großer Ent[342]fernung am Orte des Leiters genau gleiche Wirkung ausüben würde wie der mit tT bezeichnete Erdmagnetismus, und endlich rR die Länge der von der Mitte dieses Stabes zur Mitte der vom Leiter umschlossenen Ebene gezogenen Geraden; so hat man nach der »*Intensitas*« zwischen den drei Zahlen t, m', r die einfachste Relation:

$$t = \frac{m'}{r^3}.$$

Substituiert man diesen Wert von t in der Gleichung für w, so erhält man:

$$w = \frac{ff}{r^3} \cdot \frac{m'}{m} \cdot \frac{1}{s}.$$

Bezeichnet endlich $r'R$ die Seitenlänge eines Quadrates, dessen Flächenraum dem Flächenraume der vom Leiter umschlossenen Ebene gleich ist, woraus die Relation

$$f = r'^2$$

*) [Diese Bemerkung, im Jahre 1851 gemacht, ist von historischem Interesse. *F. K.*]

folgt, und setzt man auch diesen Wert von f in die obige Gleichung, so erhält man:

$$w = \frac{r'^3}{r^3} \cdot \frac{m'}{m} \cdot \frac{r'}{s}.$$

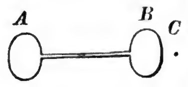
Auf den Wert des Faktors $\left(\frac{r'^3}{r^3} \cdot \frac{m'}{m}\right)$ hat nun, wie von selbst einleuchtet, eine Änderung der gegebenen Maße gar keinen Einfluß; dagegen hat eine Änderung der gegebenen Raum- und Zeitmaße auf den Wert des Faktors $\frac{r'}{s}$, und dadurch auf den Wert der Zahl w Einfluß, wenn nicht beide Maße zugleich proportional vergrößert oder verkleinert werden. Der Wert der Zahl w ergibt sich hieraus also unabhängig von allen Änderungen der gegebenen Maße, solange dadurch keine Änderung im Geschwindigkeitsmaße verursacht wird. Wird aber durch eine Veränderung der gegebenen Maße das Geschwindigkeitsmaß $n$mal verkleinert oder vergrößert, so ergibt sich für den Faktor $\frac{r'}{s}$ und folglich auch für die Zahl w ein $n$mal größerer oder kleinerer Wert, was so viel heißt, [**343**] als daß der Widerstand gegenwärtig nach einem $n$mal kleineren oder größeren Maße ausgedrückt wird. Die Unveränderlichkeit der Maßeinheit für galvanische Leitungswiderstände hängt also nach der gegebenen Erklärung bloß von der Unveränderlichkeit des gegebenen Geschwindigkeitsmaßes ab. Wird das Geschwindigkeitsmaß $n$mal größer oder kleiner genommen, so wird damit zugleich auch die Maßeinheit für galvanische Leitungswiderstände $n$mal vergrößert oder verkleinert.

§ 2.

Schema für die Messung eines galvanischen Leitungswiderstandes nach absolutem Maße.

Die Längen- und Zeitmessungen, welche nach dem vorigen Paragraph zur Bestimmung des galvanischen Widerstandes eines Leiters genügen, setzen Verhältnisse voraus, von deren zweckmäßigen Anordnung die praktische Ausführbarkeit und Genauigkeit einer solchen Bestimmung abhängt. Zur einfachen Übersicht der wesentlichen Verhältnisse diene folgendes Schema:

Aus dem galvanischen Leiter, dessen Widerstand gemessen werden soll, werden zwei kreisförmige Ringe A und B gebildet, welche auf die in der Figur dargestellten Weise zusammenhängen. Der ganze aus den beiden Kreisen A, B und den beiden Verbindungsstücken bestehende Leiter bildet eine in sich zurücklaufende Linie, von welcher der Einfachheit wegen angenommen wird, daß sie in einer Ebene liege, und daß die die Mittelpunkte beider Kreise verbindende Gerade mit der Richtung des Erdmagnetismus zusammenfalle. T bezeichne die Stärke des Erdmagnetismus, wie sie, nach absolutem Maße ausgedrückt, aus magnetometrischen Messungen gefunden wird, r bezeichne die der Einfachheit wegen einander gleichgesetzten Halbmesser der beiden Kreise. Projiziert man nun den Kreis A nach der Richtung des Erdmagnetismus AB auf eine gegen AB senkrechte Ebene, so ist der Flächenraum der von der Projektion begrenzten Ebene $= 0$. Die Beugsamkeit [**344**] der die beiden Kreise verbindenden Drähte möge aber gestatten, den Kreis A zu drehen und gegen AB senkrecht zu stellen, wo dann der Flächenraum der von derselben Projection begrenzten Ebene $= \pi r^2$ wird. Diese Drehung geschehe in einer kurzen Zeit s auf eine solche Weise, daß der Flächenraum der von der Kreisprojektion begrenzten Ebene in dieser Zeit von 0 bis πr^2 gleichförmig wachse. Es ergibt sich dann nach den magnetoelektrischen Gesetzen eine elektromotorische Kraft, welche der Erdmagnetismus T auf den gedrehten kreisförmigen Leiter A während der Zeit s ausübt, und welche nach der im vorigen Paragraph erklärten Maßeinheit durch eE ausgedrückt wird, wo die Zahl e durch die Gleichung



$$e = \frac{\pi r^2}{s} \cdot T$$

bestimmt ist. Durch diese elektromotorische Kraft wird während der Zeit s ein durch den ganzen geschlossenen Leiter gehender Strom hervorgebracht, dessen Intensität nach der im vorigen Paragraph erklärten Maßeinheit mit iJ bezeichnet werden soll. Dieser Strom geht auch durch den Kreis B und wirkt von hier aus auf eine entfernte Magnetnadel in C, deren Drehungsachse, auf der Richtung des Erdmagnetismus AB senkrecht, in der Ebene des Kreises liegt. C liege in der

verlängerten AB*). Es ergibt sich nun aus den elektromagnetischen Gesetzen, daß das von dem durch den Kreis B gehenden Strom auf die Nadel in C ausgeübte Drehungsmoment dem von einem Magnetstabe ausgeübten Drehungsmomente gleich ist, welcher im Mittelpunkte des Kreises B so aufgestellt würde, daß seine magnetische Achse auf der Kreisebene senkrecht wäre, wenn sein nach absolutem Maße ausgedrückter Magnetismus M

$$M = \pi r^2 i$$

ist. Wenn nun ferner der nach gleichem Maße ausgedrückte Magnetismus der Nadel in $C = m$ und $BC = R$ ist, und φ den Winkel bezeichnet, welchen die magnetische Achse der Nadel in C mit der Richtung des Erdmagnetismus [**345**] AB macht, so wird das von dem Stabmagnetismus M auf den Stabmagnetismus m ausgeübte Drehungsmoment nach bekannten magnetischen Gesetzen durch

$$\frac{Mm}{R^3} \cdot \cos \varphi = \frac{\pi r^2}{R^3} \cdot im \cos \varphi$$

ausgedrückt. Hieraus ergibt sich, wenn K das Trägheitsmoment der Nadel bezeichnet, die Acceleration der Drehung:

$$\frac{d^2 \varphi}{ds^2} = \frac{\pi r^2}{R^3} \cdot \frac{im}{K} \cdot \cos \varphi,$$

und folglich, wenn die Nadel vorher in Ruhe und $\varphi = 0$ war, die Drehungsgeschwindigkeit am Ende der Zeit s

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{\pi r^2}{R^3} \cdot \frac{im}{K} s.$$

Aus dieser Geschwindigkeit findet man endlich für die aus unmittelbarer Beobachtung bekannte größte Elongation α der dadurch in Schwingung gesetzten Nadel, nach den bekannten Schwingungsgesetzen durch Multiplikation mit der Schwingungsdauer t und durch Division mit der Zahl π folgenden Ausdruck:

$$\alpha = \frac{r^2}{R^3} \cdot \frac{im}{K} \cdot st.$$

---

*) D. h. der die Centra der Kreise A und B verbindenden Linie.

Für die Schwingungsdauer t hat man aber die bekannte Gleichung:

$$mT = \frac{\pi\pi K}{tt},$$

woraus

$$\frac{mt}{K} = \frac{\pi\pi}{tT}$$

und also

$$\alpha = \frac{\pi\pi r^2}{R^3} \cdot \frac{is}{tT} \cdot$$

Nun ist α durch unmittelbare Beobachtung gefunden, folglich erhält man hieraus zur Bestimmung der Zahl i

$$i = \frac{R^3}{\pi\pi r^2} \cdot \frac{t}{s} \cdot T\alpha.$$

[**346**] Man könnte nun ferner, indem man beachtet, daß der durch den Kreis B gehende Strom auch den Kreis A durchläuft, auch die Wirkung des Kreisstromes A auf die Nadel in C berechnen; indessen möge hier der Einfachheit wegen angenommen werden, daß die Entfernung AC so groß sei, daß diese Wirkung gegen die Wirkung des Kreisstromes B verschwinde: es gibt dann die wirklich beobachtete Elongationsweite der Nadel in C unmittelbar den Wert von α.

Sonach wird also von der nach absolutem Maße ausgedrückten elektromotorischen Kraft eE, für welche

$$e = \frac{\pi r^2}{s} \cdot T$$

gefunden worden ist, in dem ganzen geschlossenen Leiter, dessen Raum gemessen werden soll, ein Strom hervorgebracht, dessen Intensität nach absolutem Maße durch iJ ausgedrückt wird, wo

$$i = \frac{R^3}{\pi\pi r^2} \cdot \frac{t}{s} \cdot T\alpha$$

gefunden worden ist. Der gesuchte Widerstand des ganzen geschlossenen Leiters wird aber nach der im vorigen Paragraph erklärten Maßeinheit durch wW ausgedrückt, wo die Zahl w durch das Verhältnis der gefundenen Zahlen e und i bestimmt ist, nämlich:

$$w = \frac{e}{i} = \frac{\pi^3 r^4}{R^3 t \alpha}.$$

Die Ausführung der Messung eines galvanischen Leitungswiderstandes nach absolutem Maße beruht hiernach auf der Messung der Größen

$$r,\ R,\ t,\ \alpha,$$

oder, mit anderen Worten, der Widerstand des ganzen geschlossenen Leiters kann nach absolutem Maße ausgedrückt werden, wenn man durch Beobachtungen erstens die Zahl α gefunden hat, welche die Elongationsweite der Nadel in Teilen des Halbmessers angibt, zweitens die Zahl $\frac{r}{R}$, welche den Halbmesser der beiden Kreise in Tei[347]len der Entfernung CB angibt, drittens die Geschwindigkeit $\frac{r}{t}$, mit welcher der Halbmesser jener Kreise während einer Schwingung der Nadel durchlaufen wird. Auch hieraus sieht man wieder, daß das Geschwindigkeitsmaß das einzige Maß ist, welches gegeben sein muß, wenn der Widerstand eines Leiters nach absolutem Maße durch Messung bestimmt werden soll.

§ 3.

Beobachtungen.

Von den vier Größen, welche nach dem vorigen Paragraph zum Zwecke der Bestimmung eines galvanischen Leitungswiderstandes nach absolutem Maße, durch Beobachtungen gefunden werden sollen, können drei wirklich leicht mit großer Genauigkeit gemessen werden, nämlich der Halbmesser r der beiden Kreise, die Entfernung $BC = R$ des Kreises B von der Nadel in C und die Schwingungsdauer der Nadel t. Es bleibt also nur die vierte Größe, nämlich die in Teilen des Halbmessers ausgedrückte Elongationsweite der Nadel α, übrig, welche gewöhnlich so klein ist, daß sie nicht beobachtet werden kann. Dies ist der Grund, warum bei der wirklichen Ausführung der Beobachtungen von der im vorigen Paragraph beschriebenen Anordnung etwas abgewichen werden muß. Um nämlich einen so großen Wert von α zu erhalten, daß er genau beobachtet werden könne, ist es erstens nötig, daß die Magnetnadel, auf welche der Kreisstrom B wirken soll, statt in einer

großen Entfernung $BC = R$, im Mittelpunkte des Kreisstromes B selbst aufgestellt werde, wo die Wirkung desto größer ist, je kleiner der Halbmesser r, im Vergleich mit R, ist. Nur muß dabei darauf geachtet werden, daß die Länge der Nadel viel kleiner sei als der Durchmesser des Kreises, damit die eigentümliche Verteilungsweise des Magnetismus in der Nadel nicht genauer in Rechnung gebracht zu werden brauche, weil die Erforschung dieser Verteilungsweise mit Schwierigkeiten verbunden ist. Zweitens ist es nötig, daß [**348**] die beiden Kreise, statt aus einer Umwindung, aus vielen Umwindungen des Leiters zusammengesetzt werden, wodurch sie sich in Ringe von größerem Querschnitt verwandeln. Es muß dann aber der Einfluß aller Umwindungen einzeln in Rechnung gebracht werden, weil sie verschiedene Halbmesser haben und nicht alle in einer Ebene mit der Nadel liegen.

Es wurde daher zu dem galvanischen Leiter, dessen Widerstand gemessen werden sollte, ein sehr langer und dicker Kupferdraht gewählt, der 169 kg wog. Davon wurden 16 kg zum Ringe A verwendet, welcher aus 145 Umwindungen bestand, die zusammen eine Fläche von nahe 105 qm begrenzten. Dieser Ring wurde vertikal aufgestellt und konnte um seinen vertikalen Durchmesser durch eine Kurbel schnell im Halbkreise gedreht werden, so daß das Perpendikel auf der Ringebene am Anfang und am Ende der Drehung mit dem magnetischen Meridian zusammenfiel. — Die übrigen 153 kg wurden zu dem Ringe B verwendet, welcher aus 1854 Umwindungen bestand, die zusammen einen 202 mm breiten und 70,9 mm hohen Querschnitt geben. Der innere Halbmesser dieses Ringes war 303,51, der äußere 374,41 mm. Dieser zweite Ring wurde fest aufgestellt, und seine Ebene fiel mit dem magnetischen Meridian zusammen. Im Mittelpunkte dieses zweiten Ringes B wurde nun eine kleine, 60 mm lange Magnetnadel mit Spiegel (wie in einem kleinen Magnetometer) an einem Kokonfaden aufgehängt und die Schwingungen und Elongationen der Nadel mit einem auf den Spiegel gerichteten Fernrohre an einer nahe 4 m von dem Spiegel entfernten Skale beobachtet.

Die Beobachtungen wurden auf folgende Weise gemacht. Der Ring A wurde zuerst so gestellt, daß seine Ebene mit dem magnetischen Meridian zusammenfiel, und die im Mittelpunkte des Ringes B aufgestellte Magnetnadel wurde dabei in Ruhe gebracht. Darauf wurde der Ring A plötzlich um 90°

gedreht. Dadurch wurde die im Mittelpunkte [**349**] des Ringes *B* befindliche Magnetnadel in Schwingung gesetzt, und es wurde mit dem Fernrohr der Stand der Nadel bei ihrer größten (positiven) Elongation, welche sie nach einer halben Schwingungsdauer erreichte, an der Skale beobachtet. Eine Schwingungsdauer später, also $1\frac{1}{2}$ Schwingungsdauer nach dem Anfang, gelangte die Nadel zu ihrer größten (negativen) Elongation nach der entgegengesetzten Seite, welche ebenfalls an der Skale beobachtet wurde. Hierauf wurde in dem Augenblicke, wo die wieder vorwärts schwingende Nadel ihren ursprünglichen Ruhestand passierte, also zwei Schwingungsdauern nach dem Beginn der Versuche, der Ring *A* um 180° zurückgedreht. Die schwingende Nadel wurde dadurch mitten in ihrer Bewegung arretiert und rückwärts geworfen, worauf nun wieder zuerst ihre größte negative und sodann ihre größte positive Elongation an der Skale beobachtet wurde. Nach Verlauf von vier Schwingungsdauern von Anfang, d. i. in dem Augenblicke, wo die Nadel, von ihrer letzten Elongation zurückkehrend, ihren usprünglichen Ruhestand passierte, wurde der Ring wieder um 180° vorwärts gedreht und sodann die nämliche Elongation wieder beobachtet, wie das erste Mal, und auf diese Weise wurden die Versuche so lange fortgesetzt, bis eine hinreichende Beobachtungsreihe erhalten worden war. Die folgende Tafel enthält vier solcher Beobachtungsreihen. Für jede Reihe sind in der ersten Kolumne die an der Skale beobachteten Elongationen der Reihe nach untereinander gestellt; in der zweiten Kolumne sind die Mittelwerte aus je zwei aufeinander folgenden, positiven oder negativen, Elongationen beigefügt worden. In der dritten Kolumne sind die Differenzen der auf positive und negative Elongation sich beziehenden Mittelwerte, d. i. die Größe der ganzen Schwingungsbogen, bemerkt worden.

Erste Reihe.			Zweite Reihe.			Dritte Reihe.			Vierte Reihe.		
467,1			467,1			463,0			462,0		
540,7	543,70		540,5	543,65		536,7	539,65		534,7	538,20	
546,7		80,10	546,8		79,65	542,6		80,40	541,7		80,00
461,4	463,60		461,3	464,00		456,6	459,25		455,3	458,20	
465,8		79,75	466,7		79,55	461,9		80,35	461,1		79,75
540,6	543,35		540,8	543,55		537,6	539,60		535,1	537,95	
546,1		79,25	546,3		79,90	541,6		79,55	540,8		79,50
462,3	464,10		461,8	463,65		458,3	460,05		456,0	458,45	
465,9		79,45	465,5		80,00	461,8		79,70	460,9		79,50
541,4	543,55		542,1	543,65		537,7	539,75		535,3	537,95	
545,7		79,75	545,2		79,70	541,8		79,95	540,6		80,05
462,3	463,80		462,8	463,95		457,9	459,80		456,0	457,90	
465,3		79,70	465,1		79,85	461,7		79,85	459,8		79,85
542,0	543,50		542,3	543,80		537,6	539,65		536,1	537,75	
545,0		79,45	545,3		80,10	541,7		79,70	539,4		79,55
462,8	464,05		462,7	463,70		458,2	459,95		456,8	458,20	
465,3		79,45	464,7		79,80	461,7		80,10	459,6		79,65
542,0	543,50		542,3	543,50		537,6	540,05		536,0	537,85	
545,0		79,65	544,7		79,75	542,5		80,05	539,7		79,70
462,9	463,85		462,8	463,75		457,3	460,00		456,5	458,15	
464,8		79,85	464,7		79,60	462,7		79,50	459,8		79,60
542,7	543,70		541,9	543,35		536,6	539,50		535,8	537,75	
544,7		79,45	544,8		79,75	542,4		79,75	539,7		79,55
463,4	464,25		462,3	463,60		457,2	459,75		456,4	458,20	
465,1		79;70	464,9		79,85	462,3			460,0		79,55
542,6	543,95		541,3	543,45					535,7	537,75	
545,3		79,75	545,6						539,8		
462,8	464,20										
465,6											
Mittel 79,64.			Mittel 79,79.			Mittel 79,90.			Mittel 79,69.		

[**351**] Der Mittelwert aus diesen vier Reihen zusammen ist 79,755 Skalenteile = 79,4 mm, welcher noch um $\frac{1}{2}$ mm zu vergrößern ist, wenn man auf den Einfluß Rücksicht nimmt, welchen es hatte, daß die Drehung des Ringes A nicht in einer so kurzen Zeit bewerkstelligt werden konnte, welche gegen die Schwingungsdauer der Nadel vernachlässigt werden durfte. Hieraus ergibt sich für α der Wert:

$$\alpha = \frac{79{,}9}{8175},$$

indem der doppelte Horizontalabstand des Spiegels von der Skale genau 8175 mm betrug.

Die Schwingungsdauer der Nadel war aus 300 Schwingungen

$$t = 10'',2818$$

gefunden worden, wobei der von der Elastizität des Aufhängungsfadens herrührende Teil der Direktionskraft den 1770. Teil der magnetischen Direktionskraft betrug, also

$$\frac{1}{1+\theta} = \frac{1770}{1771}$$

war. Endlich wurde noch, wegen der großen Entfernung der beiden Ringe in einem nicht eisenfreien Lokale, die Schwingungsdauer einer und derselben Nadel am Orte der beiden Ringe verglichen und ihr Verhältnis wie 2,9126 : 2,9095 gefunden, woraus sich ergibt, daß wenn T' den Erdmagnetismus für A, T'' für B bezeichnet,

$$T' : T'' = 470 : 471.$$

Diese Beobachtungen genügen, um den Widerstand des ganzen geschlossenen Leiters nach absolutem Maße zu bestimmen, und es wird daraus nach genauer Berechnung

$$w = 2166 \cdot 10^8$$

gefunden.

§ 4.

Anwendung des Prinzips der Dämpfung.

Statt den Erdmagnetismus zu benutzen, um eine auf absolutes Maß zurückführbare elektromotorische Kraft dar-[**352**] zustellen, kann man auch den Stabmagnetismus in Anwendung

bringen, und es leuchtet dann von selbst ein, daß die zweckmäßigste Stelle für den Magnetstab, dessen Magnetismus dazu in Anwendung kommen soll, im Mittelpunkte des vom induzierten Leiter gebildeten Ringes sein werde. Dabei kann dann entweder der Magnetstab feststehen und der Ring um seinen auf der magnetischen Achse des Magnetstabes senkrechten Durchmesser hin und her gedreht werden, oder es kann umgekehrt der Ring feststehen und der Magnetstab um jenen Durchmesser hin und her gedreht werden. Im letzteren Falle kann eine starke, im Mittelpunkte des Ringes aufgehangene schwingende Magnetnadel benutzt werden.

Der Strom, welcher durch die von dem Stabmagnetismus einer im Mittelpunkte des Ringes schwingenden Magnetnadel herrührenden elektromotorischen Kraft in dem geschlossenen Leiter hervorgebracht wird, wirkt nun aber nach dem Prinzipe der Dämpfung selbst wieder rückwärts auf die schwingende Nadel und bringt eine Abnahme ihrer Schwingungsbogen hervor, welche mit großer Genauigkeit beobachtet werden kann, und die Intensität dieses Stromes läßt sich auch aus diesen Beobachtungen ebenfalls nach absolutem Maße bestimmen. Es leuchtet daraus ein, daß der Strom alsdann gar nicht durch einen zweiten, als Galvanometer dienenden Ring geleitet zu werden braucht, um die Intensität des Stromes zu messen. Es kann daher der ganze Leiter, dessen Widerstand gemessen werden soll, zur Bildung eines einzigen Ringes, welcher zugleich als Induktor und Multiplikator dient, benutzt werden.

Nach dieser Vereinfachung genügt die Beobachtung der Schwingungsbogen einer im Mittelpunkte des Ringes schwingenden Magnetnadel, durch deren Größe die Stärke der elektromotorischen Kraft, welche auf den geschlossenen Leiter wirkt, und durch deren Abnahme die Intensität des von jener elektromotorischen Kraft in dem geschlossenen Leiter hervorgebrachten Stromes bestimmt werden kann.

[**353**] Bei der Ausführung der Beobachtungen nach diesem Prinzipe der Dämpfung kommt es hauptsächlich darauf an, daß der Magnetismus der im Mittelpunkte des Ringes schwingenden Nadel recht stark sei, um eine starke Dämpfung zu bewirken, daß aber zugleich auch die Länge der Nadel im Vergleich mit dem Durchmesser des Ringes recht klein sei, damit zur Berechnung des Widerstandes des geschlossenen Leiters keine genaue Kenntnis der Verteilungsweise des Magnetismus in der Nadel erforderlich sei, deren genauere Erforschung

Schwierigkeiten findet. In dem jetzt allein gebrauchten Ringe, welcher der nämliche ist, welcher vorher mit B bezeichnet wurde und 303,51 mm inneren und 374,41 mm äußeren Halbmesser und 202 mm Höhe hatte, wurde eine bei 90 mm Länge möglichst starke Magnetnadel aufgehangen und damit begonnen, daß die Enden des den Ring bildenden Drahtes voneinander gelöst wurden. Die Nadel wurde alsdann in Schwingung gesetzt und nach der von *Gauß* in den »Resultaten aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins im Jahre 1837« gegebenen Anleitung die Schwingungsdauer der Nadel und die Abnahme ihrer Schwingungsbogen, oder das logarithmische Dekrement dieser Abnahme, bestimmt. Darauf wurde der ringförmige Leiter geschlossen und die nämlichen Beobachtungen wiederholt. Sodann wurde der Leiter wieder gelöst und auf diese Weise mehrmals abgewechselt. Die Resultate dieser Beobachtungen sind in der folgenden Tafel zusammengestellt, wo in der ersten Kolumne unter A das logarithmische Dekrement der Abnahme der Schwingungsbogen bei geschlossenem Leiter, in der zweiten Kolumne unter B das nämliche bei offenem Leiter, in der dritten Kolumne unter t die dabei beobachtete Schwingungsdauer angegeben ist. Darunter sind die Mittelwerte bemerkt.

[**354**]

A	B	t
0,028 645	0,000 460	9,1128
0,027 955	0,000 360	9,1148
0,028 565	0,000 380	9,1107
0,028 388	0,000 400	9,1128

Hieraus ergibt sich also der von der Dämpfung herrührende Teil des logarithmischen Dekrements, nach dem *Brigg*schen Systeme = 0,028 388 − 0,000 400 = 0,027 988, oder, nach dem natürlichen Systeme,

$$\lambda = 0{,}064\,445.$$

Der Stabmagnetismus der schwingenden Nadel M, aus magnetometrischen Messungen bestimmt, war nach absolutem Maße im Verhältnis zum horizontalen Teile der erdmagnetischen Kraft T gefunden worden:

$$\frac{M}{T} = 20\,733\,000.$$

Der von der Elastizität des Aufhängungsfadens herrührende Teil der Direktionskraft der Nadel endlich war 68mal kleiner als der vom Magnetismus herrührende gefunden worden, oder

$$\frac{1}{1+\theta} = \frac{68}{69}.$$

Für die Berechnung des Leitungswiderstandes aus diesen nach dem Prinzipe der Dämpfung ausgeführten Beobachtungen ergeben sich folgende Regeln.

Nach dem Gesetze der magnetischen Induktion ist die elektromotorische Kraft eines im Mittelpunkte eines kreisförmigen Leiters schwingenden kleinen Magnets, dessen magnetische Achse mit der Kreisebene den Winkel φ macht, seinem Magnetismus M, dem Kosinus des Winkels φ und der Drehungsgeschwindigkeit $\frac{d\varphi}{dt}$ direkt, dem Halbmesser des Kreises r umgekehrt proportional, und wird, wenn M nach absolutem Maße ausgedrückt ist, ebenfalls nach absolutem Maße bestimmt durch:

[355]
$$e = \frac{2\pi M}{r} \cdot \cos\varphi \frac{d\varphi}{dt}.$$

Nach elektromagnetischem Gesetze dagegen ist das Drehungsmoment, welches der im kreisförmigen Leiter induzierte Strom auf den im Mittelpunkte schwingenden kleinen Magnet ausübt, dem Magnetismus M, dem Kosinus des Winkels φ und der Stromintensität i direkt, dem Halbmesser r umgekehrt proportional, und wird, wenn auch i nach absolutem Maße ausgedrückt ist, ebenfalls nach absolutem Maße bestimmt durch:

$$D\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi M}{r} \cdot i \cos\varphi.$$

Für kleine Schwingungen, bei welchen φ wenig von 0 abweicht, ist

$$e = \frac{2\pi M}{r} \cdot \frac{d\varphi}{dt}$$

$$D\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi M}{r} \cdot i.$$

Bezeichnet K das Trägheitsmoment des schwingenden Magnets, auf welchen die vom horizontalen Theile der erdmagnetischen Kraft herrührende Direktionskraft MT wirkt, so ergibt sich die Gleichung seiner Bewegung:

$$0 = \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{MT}{K}\varphi + \frac{D}{K}\frac{d\varphi}{dt}$$

und hieraus durch Integration:

$$\varphi = p + Ae^{-\frac{Dt}{2K}} \sin(t-B)\sqrt{\left(\frac{MT}{K} - \frac{1}{4}\frac{DD}{KK}\right)}.$$

Hierin ist $\frac{D}{2K}$ das auf die Zeiteinheit reduzierte logarithmische Dekrement der Abnahme der Schwingungsbogen nach dem natürlichen Systeme; also ist, wenn τ die Schwingungsdauer unter dem Einflusse der Dämpfung bezeichnet:

$$\lambda = \frac{D\tau}{2K} = \frac{\pi M}{rK} \cdot \frac{dt}{d\varphi} \cdot \tau i$$

und die Stromintensität:

$$i = \frac{rK\lambda}{\pi M\tau} \cdot \frac{d\varphi}{dt}.$$

[**356**] Es folgt hieraus zur Berechnung des Leitungswider-widerstandes

$$w' = \frac{e}{i} = \frac{2\pi\pi MM}{r^2 K\lambda} \cdot \tau.$$

Aus obiger Gleichung für φ ergibt sich aber zur Bestimmung der Schwingungsdauer unter dem Einfluß der Dämpfung

$$\tau\sqrt{\left(\frac{MT}{K} - \frac{1}{4}\frac{DD}{KK}\right)} = \pi = \tau\sqrt{\left(\frac{MT}{K} - \frac{\lambda\lambda}{\tau\tau}\right)},$$

woraus

$$\frac{M\tau}{K} = \frac{\pi\pi + \lambda\lambda}{\tau T},$$

also

$$w' = \frac{2\pi\pi}{r^2} \cdot \frac{\pi\pi + \lambda\lambda}{\lambda\tau} \cdot \frac{M}{T}.$$

Hiernach berechnet, mit Rücksicht auf die aus der Zusammensetzung des Dämpfers aus vielen Umwindungen und aus der Elastizität das Aufhängungsfadens sich ergebende Korrektion, findet man aus obigen Beobachtungen:

$$w' = 1898 \cdot 10^8.$$

§ 5.

Vergleichung der nach absolutem Maße bestimmten Leitungswiderstände mit Jacobis Widerstandsetalon.

Zur Vergleichung des Widerstandes zweier Leiter gibt es sehr verschiedene Methoden, auf deren Erörterung hier nicht eingegangen zu werden braucht. Nach einer solchen in der Abhandlung näher erörterten Methode sind die beiden in den vorhergehenden Paragraphen betrachteten Leitungswiderstände verglichen und gefunden worden:

$$w : w' = 1138 : 1000.$$

Reduziert man nach diesem Verhältnisse den ersten Widerstand auf den letzteren, so hat man dafür

$$w' = \frac{1000}{1138} w = 1903 \cdot 10^8,$$

während die unmittelbare Bestimmung im vorigen Paragraph

$$w' = 1898 \cdot 10^8$$

gegeben hat. Aus diesen beiden, nach ganz verschiedenen [357] Methoden gefundenen, sehr nahe übereinstimmenden Angaben soll in der Folge

$$19 \cdot 10^{10}$$

als mittlerer Wert für diesen Widerstand angenommen werden.

Auf die Wichtigkeit, welche die Einführung eines bestimmten, von allen Physikern angenommenen Maßes für die Leitungswiderstände, wie auch für die elektromotorischen Kräfte und Stromintensitäten, gegenwärtig habe, wo so viele galvanische Untersuchungen mit so mannigfaltigen Instrumenten gemacht werden, deren Vergleichung untereinander oft von großem Interesse ist, hat besonders *Jacobi* aufmerksam gemacht, und hat zu diesem Zwecke für den Leitungswiderstand ein Grundmaß in einem Kupferdrahte vorgeschlagen, welchen er mehreren

Physikern, die sich mit galvanischen Messungen beschäftigen, mit der Aufforderung zugesandt hat, diesen Widerstandsetalon mit ihren Widerstandsmessern zu vergleichen und ihre Messungen künftig nach diesem Messer anzugeben.

Dieser Widerstandsetalon ist ein Kupferdraht von $7619\frac{3}{4}$ mm Länge und $\frac{2}{3}$ mm Dicke, welcher $22\,449\frac{3}{10}$ mg wiegt.

Dieses von *Jacobi* eingeführte Widerstandsmaß, welches, wie zu hoffen, allgemeine Annahme finden wird, wird keineswegs durch das hier erörterte absolute Maß verdrängt; denn es ist nicht möglich, jeden Widerstand nach diesem absoluten Maße unmittelbar zu bestimmen, während jeder Widerstand mit dem *Jacobi*schen Maße unmittelbar verglichen werden kann. Bei der Bedeutung aber, welche die absoluten Maßbestimmungen für viele Untersuchungen haben, ist es von Wichtigkeit, alle nach dem *Jacobi*schen Maße gemachten Angaben auf absolutes Maß reduzieren zu können, was durch eine Vergleichung des oben nach absolutem Maße bestimmten Widerstandes mit dem Widerstande des *Jacobi*schen Etalons leicht geschehen kann.

Eine solche Vergleichung ist nun zu diesem Zwecke wirklich ausgeführt worden und hat ergeben, daß diese [**358**] beiden Leitungswiderstände sich nahe wie 32 : 1 verhalten, oder genauer wie 19000 : 598. Da nun also der erstere Leitungswiderstand nach absolutem Maße zu 190000 Millionen Einheiten gefunden worden ist, so entspricht das *Jacobi*sche Widerstandsmaß 5980 Millionen Einheiten, oder man erhält ganz nahe die nach *Jacobi*s Maße bestimmten Leitungswiderstände durch Multiplikation mit 6 Milliarden nach absolutem Maße ausgedrückt. Es würde nach dieser Bestimmung möglich sein, das *Jacobi*sche Maß, auch wenn es verloren ginge, näherungsweise wieder herzustellen.

§ 6.

Über den von Kirchhoff gefundenen Wert der Konstanten, von welcher die Intensität induzierter elektrischer Ströme abhängt.

Die von *Neumann* in seiner Aufstellung der mathematischen Gesetze der induzierten elektrischen Ströme mit ε bezeichnete Induktionskonstante hat folgende Bedeutung. Bezeichnet man mit W die oben für galvanische Leitungswiderstände aufgestellte absolute Maßeinheit, mit W' dagegen dasjenige Widerstandsmaß, dessen man sich wirklich bedient, ferner mit C das

Geschwindigkeitsmaß, welches bei Aufstellung obiger absoluter Maße zugrunde liegt (1 mm in 1 Sekunde), mit C' dagegen dasjenige Geschwindigkeitsmaß, dessen man sich bei Messung der induzierenden Bewegungen und Wirkungen der induzierten Ströme wirklich bedient (1 preußischer Zoll = 26,154 mm in 1 Sekunde bei *Kirchhoff*); so ist

$$\varepsilon = 2\frac{C'W}{CW'}.$$

Es geht daraus hervor, daß wenn der Wert dieser Induktionskonstanten ε einmal bestimmt ist, jeder nach dem gewählten Maße gegebene Widerstand auf absolutes Maß zurückgeführt werden kann.

Bei der von *Kirchhoff* im 76. Bande dieser Annalen gegebenen Bestimmung der Induktionskonstanten ε ist zum [**359**] Widerstandsmaße der Widerstand eines Kupferdrahtes gewählt worden, dessen Länge 1 preußischer Zoll = 26,154 mm und dessen Querschnitt 1 preußischer Quadratzoll = 684 qmm ist. Leider ist hierdurch kein ganz bestimmtes Widerstandsmaß gegeben, weil verschiedene Stücke Kupfer bei den nämlichen Dimensionen verschiedenen Widerstand haben, und es folgt daraus, daß auch der Wert der Induktionskonstanten ε innerhalb der jener Variabilität des Kupferwiderstandes entsprechenden Grenzen dabei unbestimmt gelassen wird. *Kirchhoff* bemerkt daher selbst: »Da die Leitungsfähigkeit des Kupfers zwischen gewissen Grenzen variiert, so ist bei der Angabe des Zahlenwertes von ε nur eine beschränkte Genauigkeit von Interesse.« *Kirchhoff* wollte nur einen Näherungswert von ε geben, welcher für seinen Zweck genügte, und er begnügte sich damit um so eher, als die von ihm gebrauchten Methoden und Instrumente auch dann, wenn er ein ganz bestimmtes Widerstandsmaß aufgestellt hätte, eine feinere Bestimmung des Zahlenwertes von ε kaum gestattet haben würden.

Es ist aber von Wichtigkeit, das Interesse, welches eine genaue Bestimmung des Zahlenwertes von ε hat, das aber durch jene Unbestimmtheit in der Wahl des Widerstandsmaßes verschwindet, durch Hebung dieser Unbestimmtheit wieder herzustellen, und dies geschieht, wenn man sich nicht an Kupfer im allgemeinen, sondern bloß an das von *Kirchhoff* bei seinen Messungen wirklich gebrauchte Stück Kupfer hält und den Widerstand eines Drahtes von diesem Kupfer, dessen Länge 26,154 mm, und dessen Querschnitt 684 qmm ist,

zum Widerstandsmaß wählt und also das von *Kirchhoff* gefundene Resultat nur auf das hierdurch genau bestimmte Maß und die damit gemachten oder darauf reduzierten Messungen bezieht.

Für dieses Maß fand nun *Kirchhoff*, indem er 1 preußischen Zoll in 1 Sekunde zum Geschwindigkeitsmaße genommen hatte:

[360]
$$\varepsilon = \frac{1}{192},$$

woraus folgt (da $C' = 26{,}154\, C$ war), daß derjenige Widerstand, welcher 52,308 Einheiten des oben aufgestellten absoluten Maßes beträgt, der 192. Teil des Widerstandes eines Drahtes von dem *Kirchhoff*schen Kupfer ist, dessen Länge 26,154 mm, und dessen Querschnitt 684 qmm ist, oder mit anderen Worten, daß das von *Kirchhoff* gewählte Widerstandsmaß 10043 mal größer ist als das oben aufgestellte absolute Maß.

Wenn nun auch diese Angabe des Zahlenwertes von ε nur als eine approximative betrachtet werden soll, so hat es doch Interesse, dieselbe mit anderen Angaben, welche auf ganz anderen Wegen und mit verschiedenen Instrumenten gefunden worden sind, zu vergleichen, weil dadurch eine Prüfung der verschiedenen dabei zu Hilfe genommenen Naturgesetze aneinander gewonnen wird. *Kirchhoffs* Messungen beziehen sich nämlich auf Ströme, welche durch Voltainduktion erzeugt waren, und es sind daher bei ihm die Gesetze der Voltainduktion, welche zur Bestimmung des Zahlenwertes von ε zu Hilfe genommen worden sind; während die von mir gemachten Messungen sich auf Ströme beziehen, welche durch Magnetinduktion erzeugt waren, und es daher die Gesetze der Magnetinduktion sind, welche bei mir zur Bestimmung des Zahlenwertes von ε führen sollen.

Es soll daher zunächst der Zahlenwert von ε gegeben werden, welcher aus den von mir gemachten Messungen sich ergibt. Daß nämlich aus diesen Messungen der Wert von ε bestimmt werden könne, sobald nur der Widerstand des *Kirchhoff*schen Kupferdrahtes mit dem Widerstande des *Jacobi*schen Etalons verglichen worden ist, leuchtet von selbst ein. Diese Vergleichung habe ich nun aber ausgeführt, nachdem ich jenen Draht von *Kirchhoff* gütigst mitgeteilt erhalten habe, und bin dadurch in den Stand gesetzt, das Resultat dieser Vergleichung

hier nach[361]träglich mitzuteilen. Das Resultat dieser Vergleichung ist folgendes:

Ein Stück von *Kirchhoffs* Draht, welches 13,573 preußische Zoll lang war und 0,4061 Quadratlinien Querschnitt hatte, besaß einen Widerstand, der sich zum Widerstande des *Jacobischen* Etalons verhielt wie

$$1 : 106.$$

Hieraus folgt das Verhältnis des Widerstandes des von *Kirchhoff* gewählten (oben näher bestimmten) Maßes zu dem Widerstande des *Jacobi*schen Etalons wie

$$1 : 106 \cdot 13{,}573 \cdot \frac{144}{0{,}4061} \cdot$$

Bezeichnet man also den Widerstand des *Jacobi*schen Etalons mit J und das von *Kirchhoffs* Widerstandsmaß mit W', so ist

$$\frac{J}{W'} = 510\,180.$$

Nun ist aber der Widerstand des *Jacobi*schen Etalons gleich 5980 Millionen Einheiten des absoluten Maßes oben gefunden worden; folglich ist, wenn das absolute Widerstandsmaß mit W bezeichnet wird

$$\frac{J}{W} = 5\,980\,000\,000;$$

folglich

$$\frac{W'}{W} = 11\,720.$$

Nun ist $\frac{C'}{C} = 26{,}154$, folglich

$$\varepsilon = 2\,\frac{C'\,W}{C\,W'} = \frac{1}{224},$$

d. i. um $\frac{1}{7}$ kleiner, als *Kirchhoff* gefunden hat. Eine größere Übereinstimmung ließ sich nicht erwarten, weil *Kirchhoffs* Angabe bloß als Näherungswert Geltung haben soll.

Es möge hier noch endlich eine Bestimmung des spezifischen Widerstandes der verschiedenen Sorten von Kupfer [362] beigefügt werden, welche zum *Jacobi*schen Etalon, dem *Kirchhoff*schen Drahte und dem von mir gebrauchten Dämpfer verwendet worden sind.

Man pflegt den spezifischen Widerstand eines Körpers nach einer absoluten Einheit anzugeben, indem man zu dieser Einheit den spezifischen Widerstand eines solchen Körpers nimmt, dessen absoluter Leitungswiderstand bei der Länge = 1 und bei dem Querschnitt = 1 dem festgesetzten Widerstandsmaße gleich ist. Die Bestimmung des spezifischen Widerstandes nach dieser Einheit findet aber besonders bei feinen Drähten eine praktische Schwierigkeit in der genauen Ausmessung ihres Querschnittes, und *Kirchhoff* hat daher zur Beseitigung dieser Schwierigkeit den Querschnitt seines Drahtes auf indirektem Wege durch Bestimmung seines absoluten und spezifischen Gewichtes und seiner Länge ermittelt.

Nun liegt aber der Bestimmung spezifischer Widerstände nach dieser Einheit die Voraussetzung zugrunde, daß der Leitungswiderstand eines und desselben Drahtes von unveränderter Länge, wenn derselbe seiner Dicke nach ausgedehnt oder zusammengedrückt werde, im verkehrten Verhältnis des Querschnittes variiere, was aber auf keine Weise nachgewiesen worden ist, auch bei den geringen Änderungen des Querschnittes, die man durch Drucke hervorbringen kann, schwerlich nachgewiesen werden kann. Man hat daher ebensoviel Grund, anzunehmen, daß sobald nur die Masse und die Länge des Drahtes unverändert bleibe, der Leitungswiderstand auch bei veränderlichem Querschnitte nicht variiere. Unter dieser Annahme mußte aber die absolute Einheit auf andere Weise festgestellt werden, nämlich als der spezifische Widerstand eines solchen Körpers, dessen absoluter Leitungswiderstand bei der Länge = 1 und bei der Masse = 1 dem festgesetzten Widerstandsmaße gleich ist. Man bestimmt darnach den spezifischen Widerstand irgend eines Körpers dadurch, daß man den nach dem festgesetzten Widerstandsmaße ausgedrückten Leitungswiderstand eines daraus gebildeten Drahtes [**363**] mit seiner Masse multipliziert und mit dem Quadrate seiner Länge dividiert.

Nach der so festgesetzten Einheit sollen nun die spezifischen Widerstände der drei Kupfersorten, welche von *Jacobi*, *Kirchhoff* und von mir gebraucht worden sind, bestimmt werden, weil, auch abgesehen von den obigen Bedenken, diese Bestimmung jedenfalls die praktisch ausführbarste und anwendbarste ist. Folgende Tafel gibt die Übersicht von diesen Bestimmungen.

Kupfersorte zu	Länge in mm	Masse in mg	Widerstand nach absolutem Maß	Spezif. Widerstand	ε
Jacobis Draht	7620	22 435	5 980 000 000	2 310 000	$\frac{1}{270}$
Kirchhoffs »	355	4278	58 500 000	1 916 000	$\frac{1}{224}$
Webers »	3 946 000	152 890 000	190 000 000 000	1 865 600	$\frac{1}{218}$

Man sieht hieraus, daß zwischen dem von *Kirchhoff* und von mir gebrauchten Kupfer nur ein geringer Unterschied stattfindet, während das von *Jacobi* gebrauchte viel mehr abweicht, indem es eine bedeutend geringere Leitungsfähigkeit besitzt. In der Vermutung, daß *Jacobi* zu seinem Etalon vielleicht galvanoplastisch niedergeschlagenes Kupfer angewendet habe, habe ich einen Draht von solchem Kupfer, den ich durch die Güte des Hrn. Prof. *Schellbach* in Berlin erhielt, einer Prüfung unterworfen und folgende Resultate gefunden, welche im Gegensatze mit obiger Vermutung beweisen, daß das galvanoplastisch gewonnene und zu Draht ausgezogene Kupfer sogar noch etwas größere Leitungsfähigkeit besitzt*).

Ein Draht von galvanoplastisch niedergeschlagenem Kupfer	Länge in mm	Masse in mg	Widerstand nach absolutem Maß	Spezif. Widerstand	ε
	12 780	221 295	1 243 000 000	1 684 000	$\frac{1}{196}$

In der letzten Kolumne hier und in der oberen Tafel sind unter ε die verschiedenen Zahlenwerte bemerkt, welche [364] für die *Neumann*sche Induktionskonstante erhalten wurden, wenn man sich an die von *Kirchhoff* gewählten Maße hält, dabei aber die verschiedenen hier betrachteten Kupfersorten in Anwendung bringen wollte. Hält man sich dagegen an die oben festgesetzten absoluten Maße, so ist $C' = C$, $W' = W$ und ε hat stets den Wert 2.

---

*) [Das spezifische Gewicht des Kupfers = 8,9 gesetzt, berechnet sich hieraus der Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt = 0,0189 Ohm, nur 10 Proz. mehr, als man dem besten Kupfer jetzt zuschreibt. *F. K.*]

§ 7.

Über die Konstanten der elektrischen Gesetze, welche von der Wahl der Maße abhängen.

Das von *Neumann* aufgestellte Gesetz induzierter elektrischer Ströme stellt die Intensität dieser Ströme als abhängig von einer Konstanten dar, deren Zahlenwert aus den Maßen bestimmt werden muß, nach welcher die in Betracht gezogenen Größen gemessen werden. Diese Konstante hat *Neumann* die Induktionskonstante genannt. Eine solche Konstante kommt nun in dem allgemeinen Ausspruch jedes Naturgesetzes vor, welcher angibt, wie eine Größe durch andere bestimmt werde. Es möge hier eine Übersicht dieser Konstanten für alle Grundgesetze folgen, welche sich auf elektromotorische Kräfte, Stromintensitäten und galvanische Leitungswiderstände beziehen. Jedes dieser Gesetze stellt die gesuchte Größe als einen Ausdruck anderer meßbaren Größen dar, welcher eine Konstante zum Faktor hat, deren Zahlenwert aus den gewählten Maßen zu bestimmen ist.

1) Das Grundgesetz der *Volta*schen Säule stellt die Intensität des Stromes i als einen Ausdruck der elektromotorischen Kraft e und des Widerstandes w dar, nämlich, wenn die Konstante, deren Zahlenwert aus den gewählten Maßen zu bestimmen ist, mit α bezeichnet ist:

$$i = \alpha \cdot \frac{e}{w}.$$

Die Konstante α hat folgende Bedeutung. Bezeichnet man mit J, E, W die oben festgesetzten absoluten Maße für Stromintensitäten, elektromotorische Kräfte und Leitungswi[365]derstände, und mit J', E', W' diejenigen Maße, deren man sich wirklich bedient, so ist

$$\alpha = \frac{JE'W}{J'EW'},$$

folglich, wenn man sich der absoluten Maße selbst bedient,

$$\alpha = 1.$$

2) Das Grundgesetz des Elektromagnetismus stellt die elektromotorische Kraft F als einen Ausdruck der Masse magnetischen Fluidums μ, der Länge ds und Intensität i des Strom-

elements, der Entfernung beider voneinander r, und einer Zahl dar, welche durch den Winkel φ gegeben ist, den r mit ds bildet, nämlich, wenn die Konstante, deren Zahlenwert aus den gewählten Maßen zu bestimmen ist, mit β bezeichnet wird:

$$F = \beta \cdot \frac{\mu i ds}{r^2} \sin \varphi.$$

Die Konstante β hat folgende Bedeutung. Bezeichnet man mit P die absolute Maßeinheit für Drehungsmomente (das Produkt eines Millimeters in diejenige Kraft, welche in einer Sekunde der Masse eines Milligramms die absolute Maßeinheit der Geschwindigkeit erteilt), mit M die absolute Maßeinheit des magnetischen Fluidums und mit J das absolute Maß für Stromintensitäten, ferner mit P', M', J' diejenigen Maße, deren man sich wirklich bedient, so ist:

$$\beta = \frac{PM'J'}{P'MJ},$$

folglich, wenn man sich der absoluten Maße selbst bedient,

$$\beta = 1.$$

3) Das *Ampère*sche Grundgesetz der Elektrodynamik stellt die elektrodynamische Anziehungskraft F als einen Ausdruck der Stromintensitäten zweier Elemente i, i' und einer Zahl dar, welche durch die Verhältnisse der Länge der beiden Stromelemente zu ihrer Entfernung $\frac{ds}{r}$, $\frac{ds'}{r}$ und **[366]** durch die drei Winkel ε, θ, θ' gegeben ist, welche ds und ds' miteinander und mit r bilden, nämlich, wenn die Konstante, deren Zahlenwert aus den gewählten Maßen zu bestimmen ist, mit γ bezeichnet wird:

$$F = \gamma \cdot ii' \cdot \frac{ds\, ds'}{r^2} (\cos \varepsilon - \tfrac{3}{2} \cos \theta \cos \theta').$$

Die Konstante γ hat folgende Bedeutung*). Bezeichnet man mit F das absolute Kraftmaß (diejenige Kraft, welche in einer Sekunde der Masse eines Milligramms die Geschwindigkeit von

*) [*Weber* selbst bemerkt später, daß die besondere Konstante für das elektrodynamische Strommaß hinfällig wird, sobald man den Faktor 2 in die *Ampère*sche Formel aufnimmt. *F. K.*]

einem Millimeter in einer Sekunde erteilt), mit J das absolute Maß für Stromintensitäten, und mit F', J' diejenigen Maße, deren man sich wirklich bedient, so ist

$$\gamma = \frac{FJ'J'}{F'JJ},$$

folglich, wenn man sich der absoluten Maße selbst bedient,

$$\gamma = 2.$$

4) Das Grundgesetz der Magnetinduktion stellt die elektromotorische Kraft e als einen Ausdruck der Masse magnetischen Fluidums μ, der Geschwindigkeit der induzierenden Bewegung c, der Länge des induzierten Elements ds und dessen Entfernung r von μ, und einer Zahl dar, welche durch die beiden Winkel φ, ψ gegeben ist, die ds mit r und c mit der Normale der Ebene rds bildet, nämlich, wenn die Konstante, deren Zahlenwert aus den gewählten Maßen zu bestimmen ist, mit δ bezeichnet wird:

$$e = \delta \cdot \frac{\mu c ds}{r^2} \sin\varphi \cos\psi.$$

Die Konstante δ hat folgende Bedeutung. Bezeichnet man mit E die absolute Maßeinheit für elektromotorische Kräfte, mit M die absolute Masseneinheit des magnetischen Fluidums, mit S die Zeitsekunde, und mit E', M', S' diejenigen Maße, deren man sich wirklich bedient, so ist

$$\delta = \frac{EM'S}{E'MS'},$$

[**367**] folglich, wenn man sich der absoluten Maße selbst bedient,

$$\delta = 1.$$

5) Das Grundgesetz der Voltainduktion stellt die elektromotorische Kraft e als einen Ausdruck der Stromintensität i und deren Änderung $\frac{di}{dt}$, der Geschwindigkeit der induzierenden Bewegung c und der Entfernung des induzierten Elements vom induzierenden r und mehreren Zahlen dar, welche durch die Verhältnisse der Länge der beiden Elemente zu ihrer Entfernung $\frac{ds}{r}$, $\frac{ds'}{r}$ und durch die vier Winkel ε, θ, θ', φ

gegeben sind, welche ds und e miteinander und mit r, und ds' mit r bilden, nämlich, wenn die Konstante, deren Zahlenwert aus den gewählten Maßen zu bestimmen ist, mit ζ bezeichnet wird:

$$e = \zeta \left[ci \cdot \frac{ds\,ds'}{r^2} (\cos \varepsilon - \tfrac{3}{2} \cos \theta \cos \theta') \cos \varphi + \tfrac{1}{2} \frac{di}{dt} \frac{ds\,ds'}{r} \cos \theta \cos \varphi \right].$$

Die Konstante ζ hat folgende Bedeutung. Bezeichnet man mit E und J die absoluten Maßeinheiten für elektromotorische Kräfte und Stromintensitäten und mit C das absolute Geschwindigkeitsmaß (1 mm in 1 Sekunde), und mit E', J', C' diejenigen Maße, deren man sich wirklich bedient, so ist:

$$\zeta = 2 \cdot \frac{EJ'C'}{E'JC},$$

folglich, wenn man sich der absoluten Maße selbst bedient,

$$\zeta = 2.$$

6) Das allgemeine Grundgesetz der elektrischen Wirkung stellt die elektrische Kraft F als einen Ausdruck der elektrischen Massen v, v', ihrer Entfernung r, ihrer relativen Geschwindigkeit $\frac{dr}{dt}$ und deren Änderung $\frac{d^2 r}{dt^2}$ dar, nämlich, wenn die Konstante, deren Zahlenwert aus den [**368**] gewählten Maßen zu bestimmen ist, mit η bezeichnet wird:

$$F = \eta \cdot \frac{vv'}{r^2} \left[1 - \frac{1}{a^2} \left(\frac{dr^2}{dt^2} - 2r \frac{d^2 r}{dt^2} \right) \right].$$

(a bezeichnet die Zahl, welche das Verhältnis derjenigen Geschwindigkeit angibt, mit welcher zwei elektrische Massen gegeneinander bewegt werden müssen, wenn sie gar keine Kraft aufeinander ausüben sollen, zu der Geschwindigkeit von 1 mm in 1 Sekunde.) Die Konstante η hat folgende Bedeutung. Bezeichnet man mit F das absolute Kraftmaß, mit N die absolute Masseneinheit des elektrischen Fluidums (diejenige Masse des elektrischen Fluidums, welche auf eine gleiche Masse in 1 mm Entfernung die absolute Einheit der Kraft ausübt), mit

R 1 mm, und mit F', N', R' diejenigen Maße, deren man sich wirklich bedient, so ist:

$$\eta = \frac{FN'N'RR}{F'NNR'R'},$$

folglich, wenn man sich der absoluten Maße selbst bedient:

$$\eta = 1.$$

Jede elektrische Kraft kann aber als elektromotorische Kraft wirken, und diese letztere e wird dann nach dem allgemeinen Grundgesetze der elektrischen Wirkung als ein Ausdruck der elektrischen Masse v, der Länge des Elements ds, in welchem die elektrische Masse, auf welche gewirkt wird, enthalten ist, der Entfernung beider voneinander r, ihrer relativen Geschwindigkeit $\frac{dr}{dt}$ und deren Änderung $\frac{d^2r}{dt^2}$ und des Winkels φ, welchen ds mit r bildet, dargestellt, nämlich, wenn die Konstante, deren Zahlenwert aus den gewählten Maßen zu bestimmen ist, mit k bezeichnet wird:

$$e = k \cdot \frac{vds}{r^2}\left[a - 1\frac{1}{a}\left(\frac{dr^2}{dt^2} - 2r\frac{d^2r}{dt^2}\right)\right]\cos\varphi.$$

[369] Die Konstante k hat folgende Bedeutung. Bezeichnet man mit E die absolute Maßeinheit für elektromotorische Kräfte, mit N die absolute Masseneinheit des elektrischen Fluidums, mit C die absolute Einheit der Geschwindigkeit (ein Millimeter in der Sekunde) mit R 1 mm, und mit E', N', C', R' diejenigen Maße, deren man sich wirklich bedient, so ist:

$$k = \frac{1}{2\sqrt{2}}\frac{EN'C'R}{E'NCR'},$$

folglich, wenn man sich der absoluten Maße selbst bedient:

$$k = \frac{1}{2\sqrt{2}}.$$



[3]

Zur Galvanometrie.

Von

Wilhelm Weber.

(Aus den Abhandl. der Göttinger Gesellsch. d. Wiss., Bd. 10, 1862.)

Bei den sich immer weiter ausdehnenden technischen Anwendungen des Galvanismus sind, um mannigfaltigen dadurch hervorgerufenen Bedürfnissen zu genügen, schon verschiedene Vorschläge zur Einführung galvanischer Widerstandsmaße (Etalons oder Standards) gemacht worden, und es dürfte den von Sachverständigen darauf gerichteten ernstlichen Bestrebungen wohl gelingen, die jenem Zwecke in weitestem Umfange und vollkommenster Weise entsprechenden Maßregeln nicht bloß ausfindig zu machen und allseitig fest zu begründen, sondern sie auch zu baldiger praktisch erfolgreicher Ausführung zu bringen.

Alle zu chemischen Analysen, galvanoplastischen, telegraphischen und anderen technischen Zwecken gebrauchten galvanischen Säulen sind, wenn sie auch konstant genannt werden, fortwährend kleineren und oft auch größeren Änderungen unterworfen, die man näher kennen lernen muß, um sie zu beherrschen. Wenn aber auch diese Säulen ganz unveränderlich wären, würden doch ihre Wirkungen bald größer bald kleiner sein, nach Verschiedenheit der Anwendungen, die von ihnen gemacht werden. Diese Wirkungen zu beherrschen, fordert daher nicht bloß eine Kenntnis der Säule selbst, sondern auch aller Körper, durch welche der Strom der Säule gehen soll, und zwar die Kenntnis ihres Widerstandes. Darum sind die Widerstandsmessungen für alle praktischen Anwendungen unentbehrlich geworden, inbesondere für die Konstruktion und Prüfung elektrischer Telegraphen, zumal bei ihrer wachsenden Ausdehnung und Verwicklung der Verhältnisse.

[4] Zu den Widerstandsmessungen ist aber ein Widerstandsmaß erforderlich. Ohne Messung mit solchem Maße können zwar die Körper, durch welche der Strom geführt werden soll, in verschiedener Weise beschrieben werden; nach einer mit solchem Maße gemachten Messung aber genügt schon eine einzige Zahl, um alles Wesentliche vollständiger und genauer auszudrücken, als durch alle Beschreibungen möglich ist. Denn es treten oft durch die Widerstandsmessungen Verschiedenheiten und Änderungen der Körper hervor, welche auch aus ihrer genauesten Beschreibung nicht erkannt werden können.

Im Grunde ist ein solches Maß auch schon frühzeitig in Anwendung gebracht worden, indem man die verschiedenen Körper, durch welche Ströme geleitet werden sollten, mit Kupferdrähten verglich, deren Länge und Querschnitt gemessen wurden. Es leuchtet nämlich ein, daß dabei, wenn auch nur stillschweigend, der Widerstand eines Kupferdrahtes von einer dem Längenmaße gleichen Länge und von einem dem Flächenmaße gleichen Querschnitt als Widerstandsmaß zugrunde lag. Doch ist die ausdrückliche Feststellung eines bestimmten Widerstandsmaßes zuerst von *Jacobi* in Petersburg im Jahre 1846 zur Sprache gebracht worden.

Jacobi sagt darüber: »Nicht minder wichtig als die Absolutheit der Strommessungen ist es, daß die Physiker die Größe der Leitungswiderstände durch eine gemeinschaftliche Einheit ausdrücken. Hier aber kann keine absolute Bestimmung stattfinden, weil es scheint, daß bei den Widerständen auch der chemisch reinsten Metalle Unterschiede stattfinden, welche durch eine Verschiedenheit der Dimensionen allein nicht erklärt werden können. — Alle diese Schwierigkeiten nun werden gehoben, wenn man einen beliebig gewählten Kupfer- oder anderen Draht bei den Physikern umher wandern läßt und diese bittet, ihre Widerstandsmeßinstrumente darauf zu beziehen und ihre Messungen künftig nur nach diesem Maße anzugeben.« Von einem solchen von *Jacobi* gewählten Widerstandsetalon (einem Kupferdrahte von 25 englischen Fuß Länge und 22 337½ mg Gewicht) sind wirklich eine Menge von Kopien gemacht und zu Widerstandsmessungen benutzt worden. Sei es aber, daß auf die Anfertigung nicht die nötige Sorgfalt verwendet worden, oder sei es, daß solche Widerstandsetalons mit der Zeit Veränderungen er[5]leiden, es haben sich zwischen diesen Kopien später sehr bedeutende Differenzen herausgestellt.

Daher hat *Siemens* in Berlin im Jahre 1860, mit besonderer

Berücksichtigung der immer dringender werdenden Bedürfnisse der technischen Physik, ein allen Anforderungen genügendes, von jedermann mit Leichtigkeit und in der nötigen Genauigkeit darstellbares neues Widerstandsmaß aufzustellen versucht, was auf Benutzung des Widerstandes des Quecksilbers beruht, als desjenigen Metalls, welches überall mit großer Leichtigkeit in ausreichender, fast vollkommener Reinheit zu beziehen oder herzustellen ist, und, solange es flüssig ist, keine andere, seine Leitungsfähigkeit modifizierende Molekularbeschaffenheit annimmt, auch in seinem Widerstande von Temperaturänderungen weniger abhängig ist als andere Metalle, und endlich durch die Größe seines spezifischen Widerstandes besondere Bequemlichkeit für die Anwendung bietet.

Mit der Aufstellung dieses neuen Widerstandsmaßes hat *Siemens* zugleich auch die Darstellung von Widerstandsskalen, als notwendigen und unentbehrlichen Vermittlern zwischen dem Maße und den zu messenden Gegenständen, verbunden und hat dieselben in solcher Ausdehnung und Vollkommenheit konstruiert, daß mit der größten Leichtigkeit und Genauigkeit alle Widerstände gebildet werden können, welche nach seinem Maße durch ganze Zahlen von 1 bis 10000 ausdrückbar sind.

Endlich wird gegenwärtig auch in England die Aufstellung eines bestimmten Widerstandsmaßes beabsichtigt, und man hofft, die allgemeine Verbreitung und Anwendung, sowie alle dadurch erreichbaren wissenschaftlichen und technischen Zwecke, durch Begründung einer Anstalt unter dem vereinten Schutze der British Association und der Royal Society sicherzustellen, von welcher jeder Experimentator in der ganzen Welt auf sein Verlangen mit einem Widerstandsstandard versehen werden soll, welcher nicht bloß für eine genau bestimmte Temperatur gilt, sondern auch mit einer Angabe seiner Variation für eine bestimmte Temperaturänderung versehen, und dessen galvanische Bedeutung endlich durch eine genaue Angabe der Kraft, welche erforderlich ist, um einen bestimmten Strom darin zu erregen, festgestellt ist.

Mit genaueren Maßbestimmungen zu diesem letzteren Zwecke, nämlich zur Erforschung der galvanischen Bedeutung eines Leiters, durch Bestimmung [6] der zur Erzeugung eines bestimmten Stromes erforderlichen Kraft, habe ich mich nun vor längerer Zeit beschäftigt, und zwar unter dem Titel der absoluten Widerstandsmessungen. Es wurde hiernach z. B.

die galvanische Bedeutung des *Jacobi*schen Widerstandsetalons durch die Angabe festgestellt, daß, um einen Strom von der nach *Gauß* festgesetzten Intensitätseinheit darin zu erregen, eine elektromotorische Kraft nach *Gauß*schem Maße von 5980 Millionen Einheiten erforderlich sei*). Eine ähnliche Bestimmung von einer anderen Kupferkette habe ich der K. Gesellschaft im Jahre 1853 vorgelegt**). Es hatte sich jedoch bei diesen bisherigen Bestimmungen mehr um die Methode und Bedeutung der damit zu gewinnenden Resultate, als um äußerste Feinheit der quantitativen Ausführung gehandelt, die nur probeweise mit den zu anderen Zwecken vorhandenen Hilfsmitteln und Instrumenten bewerkstelligt worden war.

Sollen nun aber diese absoluten Widerstandsmessungen weitere Anwendung finden, sollen sie benutzt werden, um allen quantitativen Resultaten wichtiger galvanischer Beobachtungen und Forschungen einen bleibenden Ausdruck zu geben; so tritt ein ähnlicher Fall wie bei anderen Fundamentalbestimmungen ein, es tritt nämlich das Bedürfnis hervor, wenigstens eine absolute Widerstandsmessung nach den strengsten Methoden, mit den vollkommensten Instrumenten und mit aller Kunst der feinsten Beobachtung auszuführen. Es ist dies eine Aufgabe, welche nur von sehr geschickten Händen, bei ungestörtester Muße und mit festeren Einrichtungen als es jetzt für physikalische Forschungen gibt, vollkommen gelöst werden dürfte. Daß es nur einer solchen Messung bedarf, die aber mit größter Feinheit ausgeführt werden muß, leuchtet leicht daraus ein, daß die Widerstände aller Körper mit dem Widerstande eines einzigen Etalons genau verglichen werden können, und daß es daher nur der genauen Kenntnis von dem absoluten Werte dieses einzigen Etalonwiderstandes bedarf, um die Vorteile aller durch absolute Werte gegebenen Beziehungen allgemein auf alle Körper zu übertragen.

Abgesehen von diesen Vorteilen, welche die Kenntnis des absoluten [7] Wertes eines solchen Etalonwiderstandes gewähren kann, bietet aber die Aufgabe dieser Messung an sich auch Interesse, wegen des Einflusses, welchen sie auf die Entwicklung der Wissenschaft gewinnt. Die Entwicklung fast der ganzen Galvanometrie läßt sich an diese Aufgabe knüpfen,

*) Abhandlungen der K. Sächs. Ges. der Wissensch. I. S. 252. [Siehe oben S. 58.]

**) Abhandl. der K. Ges. der Wissensch. zu Göttingen. 5. Bd.

und alle Fortschritte der Galvanometrie lassen sich an der Lösung dieser Aufgabe erproben. Ist einmal, nach Erlangung der Einsicht in die Möglichkeit der Lösung, das zu erreichende Ziel bestimmt bezeichnet, so ist jede vollkommnere Lösung als Beweis von den Fortschritten der Galvanometrie fast wichtiger als durch ihren eigenen unmittelbaren Nutzen.

Durch feinere Ausbildung der absoluten Widerstandsmessung werden nicht bloß wesentliche Lücken der Galvanometrie ausgefüllt, sondern auch viele zerstreute Untersuchungen in einen engeren Zusammenhang gebracht. Umgekehrt würde, wenn auf anderem Wege eine höhere Ausbildung der Galvanometrie erreicht werden sollte, die feinere Ausführung der absoluten Widerstandsmessung die Folge davon sein. Es sollen nun hier einige solche, der feineren Ausführung der absoluten Widerstandsmessung dienende galvanometrische Untersuchungen näher betrachtet werden.

Man unterscheidet Galvanometer und Galvanoskope. Jene, zu denen die Tangentenbussolen gehören, dienen nur für stärkere Ströme, deren Intensität aber damit nach genau bekanntem absoluten Maße ausgedrückt erhalten wird; diese dagegen dienen zur Beobachtung der geringsten Spuren von Strömen, von denen sonst nichts wahrgenommen werden kann. Die große Empfindlichkeit der letzteren wird aber nur durch sehr enge Umschließung der Nadel von ihrem Multiplikator erreicht, wodurch die genauere Kenntnis des Maßstabes verloren geht, die sich bei der Tangentenbussole aus der Konstruktion von selbst ergibt. Um dennoch ein solches Galvanoskop zu Messungen zu gebrauchen, bedarf es daher außer der Beobachtung des vom Strome hervorgebrachten Ausschlags noch irgend einer Beobachtung als Maßstab für die Empfindlichkeit des Instruments. In der Regel sucht man diesen Maßstab ein für allemal festzusetzen, durch vorausgeschickte korrespondierende Beobachtungen am Galvanometer und Galvanoskope. Abgesehen aber davon, daß solche korrespondierende Beobachtungen, wegen der so sehr verschiedenen Empfindlichkeit beider Instrumente, kein genaues Resultat ergeben, [8] ist der Maßstab der Empfindlichkeit für sehr empfindliche Galvanoskope in der Regel gar nicht konstant, und kann daher gar nicht vorausbestimmt werden. Dagegen läßt sich mit der Beobachtung des Ausschlags eine andere Beobachtung, nämlich die der Schwingungsdämpfung verbinden, welche jenen Maßstab unmittelbar gibt.

Auf dieser Verbindung beruht die Möglichkeit, die empfindlichsten Galvanoskope zu den genauesten Messungen zu gebrauchen, was die notwendige Bedingung für die Ausführung absoluter Widerstandsmessung bildet. Galvanoskope zu diesem Gebrauche bedürfen aber einer von gewöhnlichen Galvanoskopen abweichenden Konstruktion, deren Theorie besonders zu entwickeln ist. Diese Entwicklung bietet noch außerdem Interesse, weil dadurch der Anwendung der empfindlichsten Galvanoskope zu vielen anderen feinen Untersuchungen der Weg gebahnt wird.

Der vorliegende Zweck fordert demnach eine solche Konstruktion, welche gestattet, Ausschlag und Dämpfung zugleich mit größter Genauigkeit zu beobachten, während bei gewöhnlichen Galvanoskopen bloß die feinste Beobachtung des Ausschlags maßgebend für die Konstruktion war. Was aber den Ausschlag vergrößert, verstärkt nicht immer die Dämpfung und umgekehrt. Dazu kommt, daß Ausschlag und Dämpfung auch nicht gewisse Grenzen überschreiten dürfen, wenn sie der feinsten Bestimmung fähig sein sollen. Die Rücksicht auf die Dämpfung ist es nun, welche insbesondere die Anwendung starker Magnete als Galvanoskopnadeln fordert, wozu dann noch das Bedürfnis einer längeren Schwingungsdauer und eines wenig veränderlichen Ruhestandes der Galvanoskopnadel hinzukommt. Es wird dadurch die Anwendung eines astatischen, von zwei starken Magneten gebildeten Systems begründet, dessen Schwingungsdauer durch Länge und Stärke des zur Aufhängung dienenden Metalldrahtes reguliert wird.

Die absolute Messung eines Etalonwiderstandes hängt nun aber nicht bloß von der Genauigkeit der galvanometrischen Messungen ab, sondern außerdem noch von der Genauigkeit unserer Kenntnis des Erdmagnetismus nach absolutem Werte am Orte und zu der Zeit jener galvanometrischen Messungen. Das höchste Ziel der galvanometrischen Messungen besteht daher darin, daß die unvermeidliche, aus der Bestimmung des Erdmagnetismus herrührende, [9] Unsicherheit im absoluten Werte des Etalonwiderstandes durch die galvanometrische Messung nicht merklich vergrößert werde. Darzulegen und zu prüfen, wie dieses Ziel zu erreichen sei, ist der Hauptzweck dieser Abhandlung, woran noch einige Erörterungen über die Kopierung von Widerstandsetalons und andere die Feststellung und Bedeutung des Widerstandsetalons betreffende Fragen werden geknüpft werden.

I. Die Methode der absoluten Widerstandsmessung.

§ 1—7.

[In einem für *Webers* Art zu denken charakteristischen Fortschreiten wird zuerst der *Ohm*sche Begriff des Widerstandes als $\frac{e}{i}$ beleuchtet. Alsdann wird gezeigt, daß ein elektromagnetisch gemessener Widerstand sich als eine Geschwindigkeit darstellt, und wie man die den Widerstand messende Geschwindigkeit verwirklichen kann, indem man den Leiter zu einem Kreise formt und ihn unter dem induzierenden Einflusse des Erdmagnetismus so rotieren läßt, daß eine in seinem Mittelpunkte befindliche Magnetnadel eine bestimmte Ablenkung zeigt. Die Methode ist bekanntlich der ersten absoluten Widerstandsbestimmung der British Association zugrunde gelegt worden.

Es wird aber ferner auf die Vorteile hingewiesen, welche das ballistische Verfahren einzelner Induktionsstöße gegenüber der stetigen Rotation besitzt, wobei der bewegte Leiter (Induktor) vom ablenkenden Leiter (Galvanometer) getrennt wird. Bei dieser Gelegenheit wird von *Weber* das neue, fundamentale Verfahren entwickelt, die Empfindlichkeitskonstante des letzteren, die sich bei engumschließenden Windungen nicht berechnen läßt, aus der Dämpfung der Magnetnadel zu bestimmen. *F. K.*]

II. Konstruktion des Galvanometers.

§ 8—14.

[Einer der Gesichtspunkte betrifft die anzustrebende Größe der Dämpfung, für welche, wie gezeigt wird, im Interesse der Genauigkeit ein Dämpfungsverhältnis ungefähr $= e$, der Basis der natürlichen Logarithmen vorteilhaft ist. Diese Größe, zugleich mit der wünschenswerten Empfindlichkeit und großen Schwingungsdauer, läßt sich sowohl mit einem astatischen Nadelpaar wie mit einer bifilar aufgehangenen Einzelnadel erzielen. Die Vorteile beider Suspensionen werden gegeneinander abgewogen, was schließlich zur Entscheidung für das astatische Paar leitet.

Eine besondere Betrachtung erfährt die Gestalt, welche, unter Innehaltung einiger anderweitig gegebener Ansprüche,

dem Multiplikator im Interesse der Ausschlagsempfindlichkeit und der Dämpfungsgröße zu geben ist. *F. K.*]

III. Galvanometrische Beobachtungen.

§ 15—20.

[Der Abschnitt enthält die absolute Widerstandsbestimmung einer aus Erdinduktor und Galvanometer bestehenden Kette. *Weber*s Gedanke ging darauf hinaus, daß man in einer solchen Kette einen Etalon schaffen solle, dessen absoluter Widerstand jederzeit bestimmbar sei, und der zur Kopierung durch Gebrauchswiderstände dienen sollte. (In der Wirklichkeit würde freilich hiergegen der große Temperaturkoeffizient des Kupferwiderstandes hindernd auftreten.) Den Widerstand seiner Kette von nahe 4 Ohm vergleicht er mit Drahtwiderständen von *W. Thomson* und *Siemens*. Eine praktische Bedeutung haben die aus einem nicht aufgeklärten Grunde, möglicherweise wegen des kleinen Lokals, in welchem die Instrumente zusammengedrängt standen, um etwa 7 Prozent zu groß ausgefallenen Werte nicht erhalten. *F. K.*]

IV. Kopierungsmethoden.

§ 21—27.

[Die Genauigkeit der verschiedenen Methoden der Widerstandsvergleichung, besonders mit dem Differentialgalvanometer und in der Brücke wird verglichen, und zwar mit dem Resultate, daß die beiden letzteren Methoden bezüglich ihrer Empfindlichkeit einander nahestehen. *F. K.*]

V. Über die allgemeinen Prinzipien der Widerstandsmessung.

§ 28.

Die Prinzipien der galvanischen Widerstandsmessung waren aus dem Wesen des galvanischen Widerstandes zu entnehmen, welcher eine Eigenschaft ponderabler Körper, z. B. eines Kupferdrahtes, ist, und mußten daher aus der von dieser Eigenschaft gegebenen Definition abgeleitet werden. Eine [**74**] solche Definition war nun zuerst auf Grund des *Ohm*schen

Gesetzes aufgestellt worden, welches die Abhängigkeit der Stromintensität in einem ponderablen Körper von den auf die darin enthaltene Elektrizität wirkenden elektrischen Kräften bestimmt. Den aus dieser Definition abgeleiteten Prinzipien gemäß ist in den ersten Abschnitten dieser Abhandlung die Methode entwickelt worden, wie der Widerstand eines gegebenen Körpers (eines Kupferdrahtes) sich am genauesten bestimmen lasse. Im letzten Abschnitte wurde endlich noch erörtert, auf welche Weise die Widerstände anderer Körper mit dem so erforschten Widerstande am genauesten verglichen werden könnten.

Alle diese Untersuchungen knüpften sich an die zuerst aufgestellte Definition vom Leitungswiderstande an, welche sich auf das bekannte, aus zusammengehörigen Messungen elektromotorischer Kräfte und Stromintensitäten abgeleitete *Ohm*sche Erfahrungsgesetz gründet, daß nämlich bei noch so verschiedenen elektromotorischen Kräften e und noch so verschiedenen Stromintensitäten i, solange wie der ponderable Körper derselbe bleibt, dem jene Kräfte und diese Ströme angehören, der Quotient $\frac{e}{i}$ immer gleichen Wert hat, während er bei verschiedenen Körpern verschiedene Werte annimmt, wonach also der für jeden Körper konstante Wert des Quotienten $\frac{e}{i}$ eine Eigenschaft des Körpers ist, welche zur Unterscheidung desselben von anderen Körpern dienen kann und sein Leitungswiderstand genannt wird.

Die hiernach mit dem Namen Widerstand bezeichnete Eigenschaft eines ponderablen Körpers muß nun zwar ihre Ursachen in der eigentümlichen Beschaffenheit des ponderablen Körpers selbst haben, an sich also unabhängig von den Kräften sowohl, die auf die in ihm enthaltenen elektrischen Fluida wirken, wie von den Bewegungen sein, in welche diese Fluida dadurch versetzt werden; diese in der Natur des ponderablen Körpers selbst liegenden Ursachen sind aber bis jetzt noch nicht erforscht worden. Wir kennen daher bloß die Wirkung seines Widerstandes aus der Erfahrung, und wissen daraus nur, daß dieselbe, bei gegebener elektromotorischen Kraft, in einer gewissen Stromintensität besteht.

Ist nun aber der Widerstand an sich eine im Wesen des

ponderablen [75] Körpers selbt begründete Eigenschaft, so können auch noch andere Wirkungen existieren, die sich erfahrungsmäßig nachweisen lassen; z. B. könnte der Fall stattfinden, daß eine solche erfahrungsmäßig nachweisbare Wirkung vorhanden wäre bei jedem gegebenen Strome, der durch den Körper geht, gleichgültig woher er rühre, oder durch welche Kräfte er hervorgebracht sei. Eine solche wirklich vorhandene Wirkung, die bei jedem gegebenen durch einen Körper gehenden Strom stattfindet, bezeichnet man mit dem Namen Stromarbeit, und es fragt sich nur, wie diese Wirkung beobachtet und ihre Abhängigkeit vom Leitungswiderstande des Körpers nachgewiesen werden könne.

Ein Strom erzeugt nun, wie die Erfahrung lehrt, in dem Leitungsdrahte, durch den er geht, Wärme, und Wärme ist, nach der mechanischen Wärmetheorie, mit Arbeit äquivalente lebendige Kraft. Darf man hiernach die durch einen Strom erzeugte Wärme als Stromarbeit betrachten, so ist diese Stromarbeit meßbar, ebenso wie der Strom, von dem sie hervorgebracht wird. Auf diese zusammengehörigen Messungen der Intensität der Ströme und der von ihnen erzeugten Wärme ist endlich von *Joule* und *Lenz* ein Erfahrungsgesetz auf gleiche Weise gegründet worden, wie das *Ohm*sche Gesetz auf die zusammengehörigen Messungen von elektromotorischen Kräften und Stromintensitäten, nämlich das Gesetz, daß bei noch so verschiedenen Stromintensitäten i, und noch so verschiedenen Wärmeerzeugungen A, solange der ponderable Körper derselbe bleibt, dem jene Ströme und diese Wärmeerzeugungen angehören, der Quotient $\frac{A}{ii}$ immer gleichen Wert hat, der daher ebenfalls, als eine Eigenschaft des ponderablen Körpers, zur Unterscheidung desselben von anderen Körpern dienen kann, für welche dieser Quotient andere Werte hat.

Dürfte nun diese zweite Eigenschaft mit jener ersteren, welche Widerstand genannt wurde, als identisch betrachtet werden (die Erfahrung lehrt wirklich die Proportionalität beider Quotienten), so erhielte man dadurch eine zweite Definition des Widerstandes, aus welcher sich ganz neue, von den bisher betrachteten ganz unabhängige Prinzipien für die Widerstandsmessung ergeben würden. Die Entwicklung einer auf diesen neuen Prinzipien beruhenden Methode der Widerstandsmessung würde sich zunächst mit Forschun[76]gen zu beschäftigen haben,

welche **erstens** die Genauigkeit der dabei in Anwendung zu bringenden Wärmemessungsmethoden, **zweitens** die Äquivalenzbestimmung der Wärme mit Arbeit, und **drittens** die Prüfung der Voraussetzung, daß alle Stromarbeit in Wärme umgesetzt werde, beträfen. Ehe jedoch auf dieses neue weite Forschungsgebiet eingegangen wird, bedarf es noch einer näheren Erörterung dessen, was unabhängig von der Betrachtung der Wärme, bloß auf Grund der bekannten allgemeinen elektrischen Gesetze, geleistet werden kann.

§ 29.

Stromarbeit nach elektrischen Gesetzen.

Von **Arbeit** ist nur die Rede, wenn Agriffspunkte von Kräften sich bewegen. Die Arbeit A eines solchen Punktes ist das Produkt der Komponente der auf ihn wirkenden Kraft, nach der Richtung seiner Bewegung, in den von ihm zurückgelegten Weg. Jedoch kann Arbeit in doppeltem Sinne genommen werden, es bedeutet nämlich entweder das Arbeiten selbst oder das Gearbeitete. Nach der gegebenen Definition ist A die Arbeit im letzteren Sinne, während Arbeit im ersteren Sinne durch den Differentialquotienten von A in Beziehung auf die Zeit, d. i. durch $\frac{dA}{dt}$ ausgedrückt wird.

Bei einem galvanischen Strome i in einem Leiterelemente α sind nun aber alle Teilchen der in α enthaltenen elektrischen Fluida Angriffspunkte der elektromotorischen Kräfte, und diese Angriffspunkte bewegen sich in der Richtung des Elements α teils vorwärts teils rückwärts. Die Arbeit A oder $\frac{dA}{dt}$ aller dieser Angriffspunkte ist die Arbeit des galvanischen Stromes i im Leiterelemente α. Daß die bewegten Angriffspunkte der Kräfte in diesem Falle keine ponderable Masse besitzen, ist für die Arbeit selbst, nach der gegebenen Definition, ohne alle Bedeutung.

Die im Elemente α enthaltene Menge **positiver** Elektrizität werde mit $+\alpha\varepsilon$ bezeichnet, und die nach elektrischem Gesetze damit proportionale darauf wirkende, in der Richtung α vorwärts gerichtete Kraft werde mit $+f$ bezeichnet, wo f der Zahlenwert ist, welcher angibt, wie oft darin [**77**] diejenige Kraft, welche der ponderablen Masseneinheit in der Zeiteinheit

die Einheit der Geschwindigkeit erteilt, enthalten ist. — Die im Elemente α enthaltene Menge negativer Elektrizität werde mit $-\alpha\varepsilon$, und die darauf wirkende, in der Richtung α rückwärts gerichtete, Kraft mit $-f$ bezeichnet. — Die Geschwindigkeit, mit welcher sich diese elektrischen Massen in der Richtung α vorwärts und rückwärts bewegen, soll mit $\pm u$ bezeichnet werden. Nach der gegebenen Definition ist dann die Arbeit der positiven Elektrizität im Elemente α, während der Zeit t,

$$A' = (+f)\cdot(+ut) = +fut;$$

die Arbeit der negativen Elektrizität im Elemente α während derselben Zeit,

$$A'' = (-f)\cdot(-ut) = +fut;$$

folglich die ganze Arbeit des galvanischen Stromes im Elemente α, während der Zeit t,

$$A = 2fut.$$

Für Arbeit, im Sinne des Arbeitens genommen, erhält man aber

$$\frac{dA}{dt} = 2fu.$$

$2f$ nennt man die auf die Elektrizität im Elemente α wirkende absolute Scheidungskraft, u die absolute Stromgeschwindigkeit, die aber beide unmittelbar weder beobachtet noch gemessen werden können.

Beobachtet und gemessen werden dagegen die auf α wirkende sogenannte elektromotorische Kraft e und die Stromintensität i, nach den früher festgesetzten absoluten Maßen.

Soll also die Stromarbeit in α bestimmt werden, so müssen die Beziehungen zwischen der Scheidungskraft $2f$ und elektromotorischen Kraft e, ferner zwischen der Stromgeschwindigkeit u und der Stromintensität i gegeben sein, wovon schon Art. 1 gehandelt worden ist. Es ist nämlich, wie dort angeführt worden (wo nur f die hier mit $2f$ bezeichnete absolute Scheidungskraft bedeutete)*),

---

*) [Die uns zur Zeit weniger geläufige Operation (f. S.) mit der Konstante c, der kritischen Geschwindigkeit im *Weber*schen Gesetz, wird in die gebräuchliche Gestalt umgeformt, wenn man bedenkt,

$$\frac{i}{u} = \frac{\varepsilon}{c}\sqrt{8},$$

$$\frac{e}{2f} = \frac{c}{\varepsilon}\sqrt{\frac{1}{8}},$$

[**78**] worin c eine aus dem Grundgesetze der elektrischen Wirkung bekannte konstante Geschwindigkeit ist, nämlich

$$c = 439\,450 \cdot 10^6 \, \frac{\text{Millimeter}}{\text{Sekunde}} .$$

Hieraus ergibt sich $2fu = ei$; folglich ist der Widerstand nach der zweiten Definition, nämlich der Quotient der Stromarbeit $\frac{dA}{dt}$ dividiert durch das Quadrat der Stromintensität,

$$\frac{1}{ii} \cdot \frac{dA}{dt} = \frac{2fu}{ii} = \frac{e}{i},$$

identisch mit dem Widerstande nach der ersten Definition, nämlich mit dem Quotienten der elektromotorischen Kraft e dividiert durch die Stromintensität i,

daß $\frac{c}{\sqrt{2}}$ die Anzahl v der in der elektromagnetisch gemessenen Elektrizitätseinheit enthaltenen elektrostatischen Einheiten darstellt (vgl. die vorvorige Abhandlung S. 29). 2ε ist die in der Längeneinheit des Leiters enthaltene, statisch gemessene Elektrizitätsmenge, positive und negative zusammengezählt, also $\frac{1}{v} \cdot 2\varepsilon$ dieselbe Menge in elektromagnetischen Einheiten. u ist ihre Geschwindigkeit, bei den positiven in, bei den negativen entgegen der (positiven) Stromrichtung gezählt, also bedeutet $\frac{1}{v} \cdot 2\varepsilon u$ die elektromagnetisch gemessene Stromstärke i. Die Gleichung $i = \frac{1}{v} 2\varepsilon u$, ist die erste der beiden obigen Gleichungen.

Ferner ist f als die Kraft definiert, die auf die statisch gemessene Elektrizitätsmenge $\alpha\varepsilon$ ausgeübt wird; $\frac{f}{\varepsilon\alpha}$, d. h. die Kraft auf die Elektrizitätseinheit bedeutet also das Potentialgefälle in elektrostatischem, folglich $\frac{v \cdot f}{\varepsilon\alpha}$ dasjenige in elektromagnetischem Maße. Endlich ist e die elektromotorische Kraft im Leiterelement α, also $e = \frac{\alpha \cdot v . f}{\varepsilon\alpha} = \frac{v \cdot f}{\varepsilon}$. Die zweite Gleichung entsteht hieraus, sobald man wieder $v = \frac{c}{\sqrt{2}}$ einsetzt. *F. K.*]

$$\frac{e}{i} = w.$$

Es ist also die Stromarbeit in einem Stromleiter $\frac{dA}{dt} = wii$, wo i die Stromintensität und w den Widerstand des Leiters nach den früher festgesetzten absoluten Maßen bezeichnen. Umgekehrt kann der Widerstand eines Stromleiters nach absolutem Maße als die Arbeit der Stromeinheit im Leiter definiert werden. Können also auf irgend eine Weise Stromarbeit wii und Stromintensität i unabhängig voneinander beobachtet und nach den festgesetzten absoluten Maßen gemessen werden, so findet man aus diesen beiden Messungen den Widerstand nach absolutem Maße $w = \frac{wii}{ii}$, ohne daß es der Kenntnis der elektromotorischen Kraft e bedarf, durch welche der Strom hervorgebracht wurde. Es wird also durch diese Prinzipien eine wesentlich neue Methode der absoluten Widerstandsmessung gewonnen.

Es ist schon bemerkt worden, wie die Beobachtung und Messung der von einem Strome in einem Leiter erzeugten Wärme benutzt werden kann, um die Stromarbeit unabhängig von der Stromintensität zu bestimmen; doch bietet sich noch ein anderer Weg dar, wo es nicht nötig ist, die Voraussetzungen der mechanischen Wärmetheorie zu Hilfe zu nehmen, sondern wo das elektrische Grundgesetz genügt, wonach meßbare Arbeit ponderabler Körper in Stromarbeit umgesetzt werden kann, so daß Stromarbeit durch [79] Messung der Arbeit bewegter ponderabler Körper sich bestimmen läßt. Doch möge der näheren Erörterung dieser Methode, die Stromarbeit zu messen, eine kure Betrachtung über das Maximum der Stromarbeit vorausgeschickt werden, die sich aus der nach elektrischen Gesetzen gegebenen Bestimmung der Stromarbeit unmittelbar ergibt.

§ 30.

Maximum der Stromarbeit.

[Behandelt das von einer gegebenen Stromquelle gelieferte Maximum der äußeren Arbeit in einem Leiter von gleichem Widerstande und die Gesamtarbeit bei Kurzschluß. *F. K.*]

§ 31.

Umsetzung der Arbeit bewegter ponderabler Körper in Stromarbeit durch elektrische Wechselwirkung.

[Für den Fall, daß eine elektromotorische Kraft in einem ruhenden Leiter einen Strom erzeugt, und daß in der Nachbarschaft ein geschlossener Leiter bewegt wird, stellt *Weber* den folgenden Satz auf und beweist ihn für zwei kreisförmige Leiter in relativ großem Abstande, wenn die Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte auf der Ebene des ruhenden Kreises und auf einem Durchmesser des bewegten Kreises senkrecht steht, um welchen dieser gedreht wird:

Während einer Bewegung, welche den bewegten Leiter mit seiner Ausgangsgeschwindigkeit wieder in der Anfangslage ankommen läßt, leisten die elektromotorischen Kräfte, welche in dem bewegten und in dem ruhenden Leiter durch Wechselinduktion entstehen, zusammen eine elektrische Arbeit, welche der mechanischen zur Bewegung aufgewendeten Arbeit gleich ist. (Die Selbstinduktion wird bei dem Beweise nicht eingeschlossen, was ja, weil sie einen »wattlosen« Strom erzeugt, keinen Fehler bildet.) *F. K.*]

Weber fährt dann fort: Man ersieht hieraus, in Beziehung auf die Arbeit der ponderablen Teilchen des geschlossenen Leiters, daß in jedem Augenblicke ein Arbeitsverlust, durch die von der Induktion hervorgebrachte Dämpfung stattfindet, welcher durch eine auf den geschlossenen Leiter wirkende Triebkraft wieder ersetzt werden muß, wenn die Drehungsgeschwindigkeit angenommenerweise unverändert bleiben soll. Dagegen findet in dem nämlichen Augenblicke ein Gewinn an Stromarbeit im geschlossenen Leiter statt von gleichem Betrage, woraus also folgt, daß hierbei durch Vermittlung der elektrischen Wechselwirkungen eine reine Umsetzung von Arbeit ponderabler Körper in Stromarbeit stattgefunden hat.

[85] Ergäbe sich also aus der Beobachtung, daß die Drehungsgeschwindigkeit wirklich ganz unverändert bliebe, und würden dabei die Triebkräfte gemessen, welche auf den sich drehenden geschlossenen Leiter wirken müßten, um diese Drehungsgeschwindigkeit unveränderlich zu erhalten, sowohl bei geöffnetem Solenoid (wodurch die zur Überwindung des Widerstandes der Luft und der Reibung erforderliche Triebkraft

bestimmt wird), als auch bei geschlossenem Solenoid (wodurch die zur Überwindung der elektrischen Dämpfung erforderliche Triebkraft zusammen mit der zur Überwindung des Widerstandes der Luft und der Reibung erforderlichen, bestimmt wird), so gäbe die Differenz der beiden gemessenen Triebkräfte, mit der ebenfalls leicht zu messenden Drehungsgeschwindigkeit multipliziert, den Wert des Stromarbeit $\frac{dA'}{dt}$ im geschlossenen Leiter, welche der darin induzierte Strom in der Zeiteinheit verrichtete.

Würde endlich mit dieser Messung der Stromarbeit $\frac{dA'}{dt}$ die Messung der Stromintensität i' noch verbunden, so ergäbe sich der Widerstand des geschlossenen Leiters, nach absolutem Werte,

$$w' = \frac{1}{i'i'} \cdot \frac{dA'}{dt} \cdot$$

§ 32.

Bestimmung der Stromarbeit durch Vermittlung von Wärmemessung, nach Versuchen von *Becquerel* und *Lenz*.

Soll der Widerstand eines Leiters nach absolutem Maße bestimmt werden, aber nicht nach der früher angewandten Methode, durch Messung der elektromotorischen Kraft und der Stromintensität, sondern nach der zuletzt angegebenen, durch Messung der Stromarbeit und der Stromintensität, so stehen im allgemeinen, wie gezeigt worden, zwei Wege offen, nach Verschiedenheit der Methode, nach welcher die Stromarbeit gemessen wird. Die Stromarbeit kann nämlich gemessen werden erstens durch Messung der Arbeit bewegter ponderabler Körper, welche in Stromarbeit umgesetzt wird, wovon [86] im vorigen Artikel gehandelt wurde, zweitens durch Messung der Wärme, in welche die Stromarbeit umgesetzt wird.

Die erstere Methode hatte darum ein besonderes Interesse, weil sie bloß auf die bekannten, der reinen Elektrizitätslehre angehörenden, Gesetze gebaut war. Die Art und Weise ihrer Ausführung ist nun zwar im vorigen Artikel an einem einfachen Beispiele erläutert worden, man würde aber damit

noch in Wirklichkeit zu keinen brauchbaren Resultaten gelangen. Es müßten zuvor wenigstens die günstigsten Verhältnisse für die nach dieser Methode erforderlichen Beobachtungen näher erörtert werden, worauf hier jedoch nicht eingegangen werden soll, weil man leicht im voraus übersieht, daß auch dann unter den stets vom Widerstand der Luft und von der Reibung fester Körper aneinander abhängigen Verhältnissen, unter denen sich alle ponderablen Körper, die wir beobachten, bewegen, die Messung der von ihnen verrichteten Arbeit, oder der zur Erhaltung ihrer Bewegung notwendigen Triebkraft, auch unter den sonst günstigsten Verhältissen nicht genau genug ausgeführt werden könnte*).

Die letztere Methode, bei welcher die Gesetze der mechanischen Wärmetheorie zu Hilfe genommen werden müssen, scheint daher praktisch die einzige zu sein, von welcher so genaue Bestimmungen der Stromarbeit erwartet werden dürfen, wie nötig wären, um aus Stromarbeit und Stromintensität einen Leitungswiderstand ebenso genau wie aus elektromotorischer Kraft und Stromintensität zu bestimmen. Es ist daher von Interesse, näher zu betrachten, was auf diesem Wege in neuerer Zeit durch die zahlreichen, namentlich von *Becquerel* und *Lenz*, darüber angestellten Versuche geleistet worden ist.

Edmond Becquerel führt in seiner Abhandlung: *Des lois du dégagement de la chaleur pendant le passage des courants électriques à travers les corps solides et liquides* (*Annales de chimie et de physique*, 1843, *tome* IX) an, daß nach seinen Versuchen ein Strom, welcher, wenn er durch Wasser geleitet würde, 3,383 ccm Knallgas in jeder Minute, bei 0° Temperatur und 0,76 m Barometerstand, erzeugen würde, in einem Platindrahte von 44 cm Länge und 0,422 g Gewicht, durch den er geht, in jeder [87] Minute so viel Wärme erzeugt, als 2,185 23 g Wasser zur Erhöhung ihrer Temperatur um 1 Grad brauchen.

Nimmt man zu diesen Angaben die von *Joule*, nach der mechanischen Wärmetheorie, gefundene Bestimmung noch zu Hilfe, wonach die Wärmemenge, welche 1 kg Wasser von 0° auf 1° zu erwärmen vermag, wenn sie in mechanische Arbeit verwandelt wird, eine Arbeitsgröße von 423,55 Kilogr.-Metern

---

*) [Diese Selbstkritik des Vorschlages wird man durch die seitdem ausgeführten Messungen mechanischer Arbeit als widerlegt ansehen dürfen. *F. K.*]

gibt; so findet man, daß die in jeder Minute in dem beschriebenen Platindrahte durch den angegebenen Strom erzeugte Wärme, wenn sie in mechanische Arbeit verwandelt wird, eine Arbeitsgröße von 2,185 23 · 0,423 55 Kilogr.-Metern gibt, also die in jeder Sekunde erzeugte Wärme den 60. Teil hiervon. Hieraus ergibt sich nach absolutem Arbeitsmaße, welches von uns auf Millimeter, Milligramm und Sekunde als Grundmaßen der Länge, der Masse und der Zeit zurückgeführt wird (wonach die Schwere $g = 9811 \frac{\text{Millimeter}}{\text{Sekunde}^2}$ zu setzen ist), die Stromarbeit

$$wii = \tfrac{1}{60} \cdot 9811 \cdot 2{,}18523 \cdot 0{,}42355 \cdot 10^9 = 151340 \cdot 10^6.$$

Was ferner die Stromintensität betrifft, nehmen wir die Angabe zu Hilfe, wonach die Intensität eines Stromes, welcher 1 mg Wasser in 1 Sekunde zerlegt, $106\frac{2}{3}$ mal größer als das absolute Intensitätsmaß ist (siehe Abhandl. d. math. phys. Klasse d. K. Säch. Ges. d. Wiss., Bd. 3, S. 224 [S. 29]). Rechnet man nun, daß 1 mg Wasser zersetzt, 1,8568 ccm Knallgas bei 0° Temperatur und 0,76 m Barometerstand gibt, so ist die Intensität des beschriebenen Stromes, welcher in jeder Minute 3,383 ccm Knallgas erzeugt, nach absolutem Maße,

$$i = \frac{1}{60} \cdot \frac{3{,}383}{1{,}8568} \cdot 106\tfrac{2}{3} = 3{,}2391.$$

Aus diesen Bestimmungen ergibt sich endlich der Widerstand des beschriebenen Platindrahtes nach absolutem Maße

$$w = \frac{wii}{ii} = \frac{151340 \cdot 10^6}{3{,}2391^2} = 14425 \cdot 10^6.$$

Dieser Widerstand, mit der Masse eines millimeterlangen Stückes des Drahtes $= \frac{422}{440}$ multipliziert und mit der in Millimetern ausgedrückten Länge des Drahtes = 440 dividiert, gibt nach den *Ohm*schen Gesetzen den Widerstand eines [**88**] Platindrahtes von 1 mm Länge und 1 mg Masse, d. i. den spezifischen Widerstand des Platins*)

$$p = 31\,443\,000.$$

*) [Hieraus berechnet sich für den cm-Würfel Platin der Widerstand 31 443 000 : (21,4 · 10 · 10) = 14 700 cm/sec = 0,000 0147 Ohm, eine Zahl, die für mittleres technisches Platin ungefähr zutrifft. *F. K.*]

[Es folgt eine entsprechende Rechnung für einen Versuch von *Lenz*, bei dem aber, wie auch *Weber* schließlich bemerkt, eine unrichtige Angabe irgend einer Versuchskonstante vorliegen muß. *F. K.*]

Die genauere Prüfung der Versuche zeigt offenbar, daß die Bestimmung des Widerstandes eines Körpers nach dieser Methode wohl ausführbar ist, was auch durch die gute Übereinstimmung des aus *Becquerels* Versuchen abgeleiteten Resultats mit den auf anderem Wege gefundenen bestätigt zu werden scheint; es müßten aber doch, um ganz zuverlässige und genaue Resultate auf diesem Wege zu erlangen, die Wärmemessungsmethoden noch sehr vervollkommnet und schärfere Bestimmungen über Äquivalenz von Wärme und Arbeit, als man bisher besitzt, gewonnen werden, und selbst dann würde doch die absolute Widerstandsmessung eines Leitungsdrahtes nach dieser Methode die Genauigkeit des durch gemessene elektromotorische Kraft und Stromintensität zu erlangenden Resultats nicht erreichen.

Teilt man aber die galvanischen Leiter in metallische, durch den Strom nicht zersetzbare, und in feuchte zersetzbare, so ergibt sich, daß bei feuchten zersetzbaren Leitern, z. B. beim Wasser, ein umgekehrtes Verhältnis wie bei Leitungsdrähten stattfindet, daß nämlich eine Widerstandsbestimmung feuchter Leiter durch gemessene elektromotorische Kraft und Stromintensität direkt fast unausführbar ist, wozu noch kommt, daß sogar eine indirekte Bestimmung durch Vergleichung des unbekannten Widerstandes des feuchten Leiters mit dem bekannten Widerstande eines Leitungsdrahtes, wegen der sogenannten Polarisation der den feuchten Leiter berührenden Metalloberfläche, große Schwierigkeiten findet. Es ist bekannt, daß daher bei aller aufgewandten Mühe und Sorgfalt die Widerstandsverhältnisse feuchter Leiter noch immer nur sehr mangelhaft erforscht sind. Die größte Bedeutung gewinnt aus diesen Gründen für diese Forschungen die andere Methode der Widerstandsmessung, nämlich durch gemessene Stromarbeit (Wärme) und gemessene Stromintensität, weil sie, auf feuchte Leiter angewendet, ebenso große Vorzüge vor der ersteren besitzt, wie die erstere, auf Leitungsdrähte angewendet, vor der zweiten besaß. Diese Vorzüge beruhen nicht allein auf den bei [91] feuchten Leitern (Wasser) anwendbaren vollkommeneren Wärmemessungsmethoden, sondern vorzugsweise auf der Unabhängigkeit der ganzen Messung von

der Betrachtung der elektromotorischen Kraft, die bei allen Ketten, wo feuchte Leiter eingeschaltet sind, immer als veränderlich betrachtet werden muß, weil die Einflüsse der Polarisation sich wohl vermindern, aber nicht ganz beseitigen lassen. Die elektromotorische Kraft ist aber bei so unregelmäßigen Veränderungen keiner genauen Bestimmung fähig.

Diese ebenso wichtige wie interessante Anwendung, welche diese zweite Methode auf absolute Widerstandsmessung feuchter zersetzbarer Leiter findet, soll, da sie in keinem engeren Zusammenhange mit dem Gegenstande dieser Abhandlung steht, einer besonderen Erörterung vorbehalten bleiben [die aber meines Wissens nicht erfolgt ist *F. K.*].

§ 33.

Über die Umsetzung der Stromarbeit in Wärme.

Die Stromarbeit ist an die Bewegung der elektrischen Fluida geknüpft; die Wärme ist, nach der mechanischen Wärmetheorie, ebenfalls an die Bewegung eines Körpers gebunden, den man aber von den elektrischen Fluidis zu unterscheiden pflegt. Eine nähere Einsicht in die Art und Weise, wie Stromarbeit in Wärme umgesetzt werde, fordert daher zunächst, daß die Bewegungen der elektrischen Fluida bis zu Ende genau verfolgt werden, um die Verhältnisse kennen zu lernen, unter welchen der Übergang der Bewegung der elektrischen Fluida in die Bewegung eines anderen Mediums stattfinde. Hierbei dürfte die ideale Annahme von der Superposition mehrerer im Raume des Leiters stetig und gleichförmig verteilter Substanzen, nämlich der ponderablen Substanz des Leiters, der beiden elektrischen Fluida und außerdem noch die eines sogenannten Wärmemediums, so angemessen sie für viele andere Zwecke sein möge, wo es sich um Fernwirkungen handelt, nicht zulässig erscheinen, vielmehr leuchtet hierbei leicht die Notwendigkeit ein, die ponderable Substanz des Leiters in einzelnen Molekülen konzentriert anzunehmen, die von elektrischen Teilchen umgeben sind, welche sich im Falle eines Stromes von einem Molekül zum anderen fortbewegen. Die Trennung eines elektrischen Teilchens von einem Molekül muß dann, der verschie[**92**]denen Größe der elektromotorischen Kraft gemäß, von welcher der Strom hervorgebracht wird, bald langsamer, bald schneller erfolgen, wovon die Zahl der in einer gewissen Zeit sich vom Molekül

trennenden elektrischen Teilchen abhängt. Die Arbeit jedes elektrischen Teilchens bei der Trennungsbewegung, infolge der von dem Molekül darauf ausgeübten Kräfte, möge nun von der Schnelligkeit der Trennung abhängig sein oder nicht; stets wird eine entgegengesetzt gleiche Arbeit von demselben Teilchen bei seiner Vereinigungsbewegung mit dem folgenden Molekül verrichtet werden, so daß diese beiden Arbeitsgrößen einander kompensieren. Sobald aber das elektrische Teilchen von dem ersteren Molekül getrennt ist, wird es, getrieben von der elektromotorischen Kraft f, den Zwischenraum α bis zum zweiten Molekül durchlaufen und dabei also die Arbeit $f\alpha$ verrichten. Die Summe aller dieser Arbeitsgrößen, $\Sigma f\alpha$, bildet die ganze Stromarbeit im Leiter. Jedes elektrische Teilchen tritt daher mit einer um den mit $f\alpha$ äquivalenten Wert vergrößerten lebendigen Kraft in das Bereich des folgenden Moleküls ein, als es aus dem Bereiche des vorhergehenden Moleküls ausgetreten war, wodurch also der Wert der lebendigen Kräfte, im Bereiche aller Moleküle zusammengenommen um einen mit der ganzen Stromarbeit äquivalenten Betrag vergrößert werden muß. Eine solche der Stromarbeit äquivalente Vergrößerung der lebendigen Kräfte in allen Molekülen zusammengenommen ist nun aber, nach der mechanischen Wärmetheorie, auch die vom Strome im Leiter erzeugte Wärme, und es fragt sich nur, ob sie mit jener ganz identisch ist, d. h. ob sie in der fortdauernden Bewegung jener elektrischen Teilchen selbst besteht, oder ob die jedem Molekül zugeführte Bewegung von den elektrischen Teilchen, welche sie mitbrachten, auf andere Körperteilchen, z. B. auf die im Bereiche desselben Moleküls befindlichen Teilchen eines besonderen Mediums übertragen werde und erst nach dieser Übertragung als Wärme hervortrete, wo dann die Gesetze der Übertragung zu erforschen und nähere Rechenschaft darüber zu geben sein würde, warum dieselbe lebendige Kraft erst dann als Wärme hervortritt, wenn sie an die Teilchen des Wärmemediums, statt an elektrische Teilchen, geknüpft ist.

Man sieht leicht ein, daß die Behauptung einer solchen Übertragung der von elektrischen Teilchen mitgebrachten lebendigen Kraft auf die Teil[93]chen eines anderen im Bereiche des Moleküls befindlichen Mediums nicht unerhebliche Schwierigkeiten findet, vorzüglich darum, weil danach konsequenterweise jede Fortdauer einer Bewegung der elektrischen Teilchen im Bereiche eines solchen ponderablen Moleküls abgeleugnet werden

müßte. Wenn die elektrischen Teilchen, welche die Stromarbeit mit sich führen, beim Eintritt in das Bereich eines ponderablen Moleküls die mitgebrachte Stromarbeit sofort, und zwar nicht bloß teilweise sondern ganz und gar, an andere materielle Teilchen (an die Teilchen des Wärmemediums) abtreten müssen; so muß aus gleichem Grunde überhaupt jede den elektrischen Teilchen im Bereiche ponderabler Moleküle erteilte Bewegung, gleichgültig woher sie rühren möge, ihnen sofort wieder entzogen werden, so daß gar keine beharrende Bewegung elektrischer Teilchen im Bereiche ponderabler Moleküle möglich wäre. Sogar die Möglichkeit des elektrischen Stromes im ponderablen Körper würde dadurch zweifelhaft werden; denn ein elektrisches Teilchen, wenn es auch von noch so großen elektromotorischen Kräften getrieben würde, könnte in eine größere Bewegung gar nicht geraten, wenn jede Bewegung im Entstehen sofort von ihm an die Teilchen des Wärmemediums übertragen würde.

Es leuchtet hieraus ein, daß die Behauptung der Übertragung aller Stromarbeit auf das Wärmemedium ponderabler Moleküle vor allem mit der Behauptung von der Existenz beharrlicher elektrischer Molekularströme, wie sie zuerst von *Ampère* aufgestellt worden, in totalem Widerspruch steht. Wer also mit *Ampère* die wirkliche Existenz zweier magnetischen Fluida leugnet und dadurch zur Behauptung beharrlicher elektrischer Molekularströme genötigt wird, darf jene Übertragung nicht zugeben, und er braucht sie um so weniger zuzugeben, weil gar nichts angeführt werden kann, was durch eine solche Übertragung gewonnen würde. Wenigstens nach der mechanischen Wärmetheorie leuchtet ein, daß in Beziehung auf die Wärme prinzipiell unmittelbar gar nichts anderes als die in den Molekülen vorhandene lebendige Kraft in Betracht kommt, für welche die Beschaffenheit ihres materiellen Trägers indifferent ist. Nur mittelbar könnte nach der mechanischen Wärmetheorie die Beschaffenheit des materiellen Trägers der das Wesen der Wärme bildenden lebendigen Kraft in Betracht kommen, nämlich insofern als [**94**] die Kräfte der Wechselwirkung der Teilchen dieses Trägers, teils untereinander teils mit anderen Teilchen, und folglich die Übertragungs- oder Fortpflanzungsgesetze (die Gesetze der Wärmestrahlung, der Temperaturmitteilung und der Temperaturausgleichung unter verschiedenen ponderablen Molekülen), davon abhängig wären.

Ist auch der Wärmeäther im leeren Raume durch die ihm, gleich dem Lichtäther, zugeschriebenen Gesetze der Wellenfortpflanzung wenigstens indirekt definiert, und kann von seiner Existenz und Verbreitung, auch im Inneren der ponderablen Körper, in den leeren Räumen zwischen den Molekülen, ohne die ganze Wellentheorie der strahlenden Wärme zu verwerfen, nicht abstrahiert werden: so findet doch zwischen den ponderablen Körpermolekülen (mit allem, was in ihrem Bereiche liegt und dazu gehört) und jenem Äther keine weitere Beziehung statt, als daß einerseits die Wellenerregung im Äther (die Wärmestrahlung), andererseits die Wellendämpfung (die Wärmeabsorption) von den ponderablen Molekülen ausgehen muß, wozu aber in den Molekülen ebensowenig ein besonderes Wärmemedium nötig ist, wie im Metall der Glocke, welche Schallwellen durch das Luftmedium aussendet, Luft enthalten zu sein braucht.

Alle diese Betrachtungen lassen sich auf folgende Weise kurz zusammenfassen. Da eine Temperaturerhöhung der ponderablen Moleküle nach der mechanischen Wärmetheorie eine Zunahme der lebendigen Kraft in den Molekülen fordert, da diese Zunahme der lebendigen Kraft durch die mit größerer Geschwindigkeit in das Bereich der Moleküle eintretenden, mit geringerer Geschwindigkeit wieder austretenden elektrischen Teilchen, welche den Strom bilden, gegeben ist, da ferner diese Zunahme an lebendiger Kraft nach der Theorie beharrlicher elektrischer Molekularströme, während die Teilchen im Bereiche der Moleküle sich befinden, ungeschwächt beharrt; so scheint von einer Umsetzung von Stromarbeit in Wärme gar nicht die Rede sein zu können, sondern die in den Molekülen angesammelte Stromarbeit scheint danach selbst als die in den Molekülen enthaltene Wärme betrachtet werden zu müssen.

Es leuchtet freilich ein, daß alsdann die Gesetze der unter dem Namen Wärmestrahlung und Wärmeabsorption zusammengefaßten Beziehungen zwi[95]schen der um die einzelnen Moleküle in beharrlicher Molekularströmung befindlichen Elektrizität und dem im umgebenden Raume befindlichen Wärmeäther noch einer näheren, auf der Natur beider Medien beruhenden, Begründung bedürfen; einer ebensolchen Begründung würden aber jene Gesetze auch bedürfen, wenn man das sogenannte Wärmemedium an die Stelle der Elektrizität setzte. Während nun im letzteren Falle eine solche Begründung gar

nicht einmal versucht worden ist, so kann man doch, was den ersteren Fall betrifft, die scharfsinnige, von *C. Neumann* ausgeführte Untersuchung: *Explicare tentatur quomodo fiat ut lucis planum polarisationis per vires electricas vel magneticas declinetur.* Halis Saxonum, 1858, als einen solchen ersten Versuch anführen; denn es leuchtet ein, daß das was *Neumann* von den Beziehungen zwischen beharrlichen elektrischen Molekularströmen und Lichtäther sagt, in ähnlicher Weise auch auf die Beziehungen zwischen beharrlichen elektrischen Molekularströmen und Wärmeäther Anwendung finden werde.

Zwar hat *Neumann* nach seinen Prämissen gefunden, daß keine Einwirkung elektrischer Molekularströme auf ruhende Ätherteilchen stattfinden könne; es ist aber dabei zu beachten, daß diese Prämissen, dem Zwecke der *Neumann*schen Untersuchung gemäß, welcher auf die Einwirkung der Molekularströme auf die schon vorhandenen, mitten zwischen den Molekülen durch den Äther fortgepflanzten Wellenzüge beschränkt war, sich zwar auf Wirkungen der Molekularstöme in sehr kleinen Entfernungen bezogen, doch aber noch immer die Zulassung einer idealen Vorstellung von den Molekularströmen gestatteten, wonach dieselben als eine Superposition entgegengesetzt gleicher Ströme positiver und negativer Elektrizität betrachtet werden, was aber offenbar nicht gestattet ist, wenn es sich um die Erregung neuer Wellenzüge durch die elektrischen Molekularströme handelt, welche nur in der an die Molekularströme unmittelbar angrenzenden Ätherschicht stattfinden kann. Für diese Ätherschicht dürfen die in entgegengesetzter Richtung sich bewegenden positiven und negativen elektrischen Teilchen nicht mehr als zusammenfallend betrachtet werden. Denkt man sich dann also z. B. das negative Fluidum mit dem Molekül als fest verbunden, und das positive Fluidum allein in Molekularströmung begriffen, oder umgekehrt (eine Vorstellungsweise, welche sich dadurch empfiehlt, daß sie mit der Beharrung der [96] Molekularströme ohne elektromotorische Kräfte bestehen kann), so leuchtet ein, daß die Verschiedenheit in Lage und Verhalten beider elektrischen Fluida im Bereiche des Moleküls zwar schon bei sehr geringen Entfernungen (wie sie *Neumann* betrachtet) nicht mehr beachtet zu werden braucht, worauf die Zulässigkeit jener idealen Vorstellung von den Molekularströmen beruht; daß sie doch aber für die unmittelbar angrenzende Ätherschicht von Bedeutung sein kann, zumal wenn das

in Molekularströmung befindliche elektrische Fluidum nicht stetig und gleichförmig um das Molekül verteilt wäre.

Findet dann aber wirklich eine Störung des Gleichgewichtes in der unmittelbar angrenzenden Ätherschicht, folglich eine Erregung von Ätherwellen statt, so leuchtet ein, daß dieselbe mit jedem Umlaufe der Elektrizität um das Molekül sich wiederholen, also die Wellendauer mit der Umlaufszeit der elektrischen Teilchen im Molekularstrome übereinstimmen muß. Bei leuchtenden Molekülen ist aber die Wellendauer der von ihnen ausgesandten Wellenzüge aus optischen Versuchen genau bekannt; es würde also, wenn die angenommene Relation zwischen elektrischen Molekularströmen und dem Lichtäther, nach *Neumanns* Idee, sich bestätigte, hiernach möglich werden, aus optischen Versuchen über das Verhalten der die Molekularströme bildenden Elektrizität nähere Auskunft zu erhalten. — Jedenfalls ist die *Neumann*sche Untersuchung schon in ihrer ersten Entwicklung für die Optik, zur Erklärung der Drehung der Polarisationsebene durch galvanische und magnetische Kräfte, so erfolgreich gewesen, daß man hoffen darf, daß die weitere Verfolgung und Ausbildung der Theorie beharrlicher elektrischer Molekularströme in ihren Beziehungen zum Licht- oder Wärmeäther und seiner Wellenbewegung zu noch vielen anderen, den so wichtigen und noch so wenig erforschten Zusammenhang zwischen Elektrizität, Wärme und Licht betreffenden, Aufschlüssen führen werde.

Wilhelm Weber.

Wilhelm Weber war der Sohn des Professors der Theologie *Michael Weber* zu Wittenberg, zwischen den Brüdern *Ernst Heinrich* und *Eduard* stehend, den späteren Professoren der Physiologie und Anatomie in Leipzig. Vor hundert Jahren, am 24. Oktober 1804, geboren, verlebte er in Wittenberg seine Kinderjahre, bis 1814 der Vater bei der Aufhebung der Universität Wittenberg nach Halle versetzt wurde. Hier besuchte *Wilhelm Weber* das Pädagogium der *Francke*schen Stiftungen und von 1822 an die Universität, promovierte 1826 und habilitierte sich 1827.

Im Jahre 1831 als Nachfolger des jüngeren *Tobias Mayer* nach Göttingen berufen, wirkte er dort bis 1843, obwohl ihm, infolge der Erklärung der Göttinger Sieben bei dem Hannoverschen Verfassungsbruch im Jahre 1837, seine Professur entzogen worden war. Er lehrte dann 1843 bis 1849 als Professor in Leipzig, später wieder in Göttingen. Er starb am 23. Juni 1891.

Wilhelm Weber nimmt einen der hervorragendsten Plätze unter den Männern ein, welche in der ersten Hälfte des verflossenen Jahrhunderts die Physik in Deutschland wieder auf einen Ehrenplatz gehoben haben. Aus der Anfangszeit in Halle, teilweise noch aus dem Jünglingsalter, stammen die mit dem älteren Bruder *Ernst Heinrich* zusammen bearbeitete grundlegende »Wellenlehre auf Experimente gegründet« und seine Arbeiten aus der Akustik, unter anderem über Interferenz und über Zungenpfeifen. Gemeinsam mit dem jüngeren Bruder *Eduard* wurden 1833 bis 1836 die Beobachtungen und Versuche ausgeführt, die in der »Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge« niedergelegt sind. Von anderen einzelnen Arbeiten seien Untersuchungen aus der Elastizitätslehre,

insbesondere über die elastische Nachwirkung, sowie originelle Konstruktionen von Wagen genannt.

Der nach der Übersiedlung an die Universität Göttingen alsbald entstandene freundschaftliche Verkehr mit *Gauß* und die durch beide Männer später erfolgte Gründung des Magnetischen Vereins löste die Reihe von experimentell wie theoretisch klassischen Arbeiten aus, welche *Webers* Leben ein halbes Jahrhundert hindurch ausfüllten. Einerseits und zunächst galten sie dem Erdmagnetismus selbst. Gekrönt wurde die Arbeit des Magnetischen Vereins durch den von *Gauß* und *Weber* herausgegebenen »Atlas des Erdmagnetismus«, der als ein Werk bezeichnet werden darf, wie es in so kurzer Zeit in solcher Vollkommenheit kaum jemals ähnlich entstanden ist. Unter den von *Weber* geschaffenen Mitteln für Messungen nimmt der, zunächst für die Inklination bestimmte, aber später in mannigfaltiger Richtung fruchtbar gewordene Erdinduktor die hervorragendste Stellung ein.

Der im Jahre 1833 zu wissenschaftlicher Verständigung zwischen Sternwarte und Physikalischem Institut in Göttingen gelegte erste elektromagnetische Telegraph hat die Namen *Gauß* und *Weber* schon frühzeitig in den weitesten Kreisen berühmt gemacht.

Aber noch größere Verdienste, welche zuerst in der wissenschaftlichen und schließlich in der ganzen Welt zur Einigung über die elektrischen Maße geführt haben — außer der Zeiteinheit wohl der einzige derartige Fall —, hat sich *Weber* durch die von ihm durchgeführte theoretische Systematik und experimentelle Verknüpfung der Einheiten des elektrischen Stromes erworben, die er auf demselben Wege entwickelte, auf welchem *Gauß* im Gebiete des Magnetismus der klassische Führer gewesen war. Die Aufsätze des vorliegenden Heftes enthalten typische Arbeiten gerade aus diesem Gebiete.

Die Mehrzahl von *Webers* ausführlichen Veröffentlichungen ist von dem Jahre 1846 an unter dem Gesamttitel »Elektrodynamische Maßbestimmungen« in den Abhandlungen der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften erschienen. Die erste Arbeit enthielt außer der Konstruktion des *Weber*schen Elektrodynamometers und der mit diesem ausgeführten messenden Bestätigung der *Ampère*schen Gesetze, die unter dem Namen des »*Weber*schen Gesetzes« bekannte Theorie der von *Ampère* und *Faraday* entdeckten Kraftäußerungen und Induktionswirkungen des elektrischen Stromes. *Weber* führt diese Wirkungen

einheitlich auf ein Grundgesetz zurück, welches er als eine Erweiterung des *Coulomb*schen Gesetzes in dem Sinne aufstellt, daß die Kraftäußerung elektrischer Teilchen, welche nach *Coulomb* durch deren Menge und Abstand gegeben erscheint, außerdem von ihrem relativen Bewegungszustande abhängig gemacht wird.

Es gelingt *Weber*, die elektrodynamischen und die Induktionswirkungen alle aus dieser merkwürdigen Anschauung abzuleiten, die vermöge eines solchen Erfolges einen Markstein in der Entwicklung der Elektrizitätslehre darstellt. Angriffe, welche später vom Standpunkte der Erhaltung der Energie gegen das Gesetz gerichtet wurden, hat *Weber* noch in seinen späteren Jahren zurückweisen können; er hat dabei dem Gesetze sogar gerade mittels des Energiebegriffs eine vereinfachte Form gegeben. Zugleich hat er in seinen letzten Arbeiten aus seinem Gesetze Folgerungen gezogen, welche Fingerzeige auf merkwürdige, noch aufzufindende Erscheinungen enthalten.

Weber behandelt die Elektrizität analog wie einen Körper, schreibt ihr eine bestimmte Masse zu und warf in der Vorlesung auch wohl die Frage auf, wie man die ponderable Welt auf Elektrizität zurückzuführen versuchen könne. Gerade wegen dieser konsequent durchgeführten materialistischen Auffassung der Elektrizität, zugleich auch wegen des Widerspruches, den die Annahme umittelbarer Fernwirkungen stets gefunden hat, sind die *Weber*schen Annahmen durch die *Faraday-Maxwell*schen Anschauungen des elektromagnetischen Raumes großenteils verdrängt und nach der glänzenden Bestätigung der *Maxwell*schen Theorie durch *Hertz* eine Zeitlang fast vergessen worden. Die noch neueren Anschauungen hingegen, welche sich am prägnantesten aus der Analyse der Kathodenstrahlen, sowie der Wechselwirkung der Elektrizität mit den ponderablen Körpern als Elektronentheorie entwickelt haben, gehen auf die *Weber*schen Anschauungen zurück und bringen seinen umfassenden Scharfblick wieder zur Anerkennung.

Die späteren Teile der elektrodynamischen Maßbestimmungen enthalten (1852) die Definition und Messung des Widerstandes nach absolutem Maße, sodann grundlegende Untersuchungen und Ansichten über den Magnetismus und Diamagnetismus der Körper; ferner mit *Rudolf Kohlrausch* die Zurückführung der elektromagnetischen Einheit des Stromes auf die elektrostatische (1856). Später folgt eine Abhandlung über elektrische Wellen in Drähten (1864) und zum Schlusse in zwei

Abschnitten (1871 und 1878) die Arbeit, welche die erwähnten energetischen Beziehungen des *Weber*schen Gesetzes entwickelt.

Auch als Lehrer hat *Weber* in wissenschaftlichen Kreisen weithin gewirkt. Das dankbare Andenken, welches er bei seinen Schülern aus allen Ländern hinterlassen hat, gilt nicht nur dem Forscher und Lehrer, sondern in ebenso reichem Maße dem vortrefflichen, gütigen Menschen.

Rudolf Kohlrausch.

Rudolf Kohlrausch wurde am 6. November 1809 zu Göttingen geboren als Sohn des späteren Generalschuldirektors in Hannover *Friedrich Kohlrausch*, des bekannten Pädagogen und Geschichtsschreibers. Die Familie siedelte 1810 nach Barmen und 1814 nach Düsseldorf, 1818 nach Münster, 1830 nach Hannover über.

Die Universitätsbildung empfing *Rudolf Kohlrausch* in Bonn und Göttingen, zuerst Zoologie, dann Mathematik und Physik studierend. Nach der Promotion (1832) war er Lehrer zuerst an der Ritterakademie in Lüneburg, dann 1835—1849 am Gymnasium in Rinteln. Nach einem Jahre akademischer Tätigkeit an der polytechnischen Schule in Kassel wurde er infolge seines Widerstrebens, aus der Hand des neuinstallierten Ministeriums Hassenpflug die Direktion dieser Schule zu empfangen, an das Gymnasium zurückversetzt, und zwar nach Marburg, wo ihm 1854 wenigstens die bescheidene Stellung des außerordentlichen Professors an der Universität zu teil wurde. 1857 befreite ihn die Berufung an die Universität Erlangen aus den damals unerquicklichen und dürftigen kurhessischen Verhältnissen.

Die endlich erreichte unabhängige Stellung hat *Kohlrausch* nicht mehr zu dem erhofften Arbeiten mit reichlicheren Mitteln benutzen können, denn er starb in Erlangen schon am 8. März 1858.

Kohlrauschs experimentelle, in ein Jahrzehnt zusammengedrängte Arbeiten betrafen wesentlich elektrostatische Messungen. Durch sein Elektrometer und seinen Luftkondensator schaffte er die Möglichkeit, Spannungen im Schließungskreise der galvanischen Kette zu messen, und behandelte in einer Reihe von Untersuchungen die Aufgaben, welche sich bei der feineren experimentellen Begründung und Ausarbeitung der

*Ohm*schen Gesetze ergaben. Ein hervorragendes Handgeschick, verbunden mit einer unübertroffenen Fähigkeit, einfache Mittel zu exakten Beobachtungen auszunutzen, ersetzten ihm die ihm damals so gut wie vollständig fehlenden Hilfsmittel eines physikalischen Laboratoriums.

Mit seinem Sinuselektrometer ging *Kohlrausch* später zur Messung höherer Spannungen über und studierte dabei die Verhältnisse der Leidener Flasche, insbesondere die Gesetze ihres elektrischen Rückstandes. Sein Ziel bei dieser zweiten Gruppe der Messungen war die Vergleichung der statischen und magnetischen Einheit des elektrischen Stromes; dieses Ziel wurde in der hier abgedruckten Arbeit erreicht. Das Verhältnis zu *Weber*, welches sich, im Briefwechsel eingeleitet, zu inniger Freundschaft gestaltet hatte, fand in dieser gemeinsamen klassischen Untersuchung seinen glänzenden Höhepunkt. Pläne zu weiterer gemeinschaftlicher Arbeit wurden durch den frühzeitigen Tod vereitelt.

Außer den genannten Untersuchungen *Kohlrausch*s sind von Bedeutung eine 1836 veröffentlichte Arbeit über die Akkomodation des Auges und eine eingehende Untersuchung über die Bestimmung der Dichte, besonders von Dämpfen und Gasen, 1856.

Einleitung.

Wilhelm Weber ist der Begründer des einheitlichen galvanischen Maßsystems und auch der nach seinem System ausgeführten Messungen selbst, insofern sie sich auf die direkte Bestimmung von Stromstärke und Widerstand gründen. Er hat ferner gleich im Beginne dieser Arbeiten (1840) auf sein elektromagnetisches Strommaß die elektrolytische und, freilich nur nebenbei, die thermische Wirkung des Stromes zurückgeführt und endlich zwölf Jahre später in der mit *Rudolf Kohlrausch* ausgeführten Messung die elektromagnetische Stromeinheit mit der elektrostatischen verglichen.

Auf diese Stromvergleichungen beziehen sich die drei ersten hier zusammengestellten Abhandlungen. Die vierte und fünfte betreffen die Definition und Messung von Widerständen, und zwar gibt die eine (1851) die erste hierauf bezügliche Veröffentlichung wieder; die andere, zehn Jahre jüngere, enthält *Weber*s Ansichten über das Wesen des Leitungswiderstandes in so charakteristischer und für moderne Ansichten interessanter Weise, daß, da der vollständige Abdruck des umfangreichen Aufsatzes zu weit führen würde, ein Auszug daraus dem Leser willkommen erscheinen muß.

I. Unser erster kurzer, den Resultaten des Magnet. Vereins a. dem J. 1840 entnommener Aufsatz *Weber*s: »Messung starker galvanischer Ströme bei geringem Widerstande nach absolutem Maße«, behandelt diese Messung mit einer Tangentenbussole von der *Weber*schen Form, welche in den meisten physikalischen Sammlungen noch jetzt zu finden ist. Zwei Anwendungen werden gemacht, einmal auf die größten Stromstärken, welche mit damaligen Elementen (*Daniell*, *Grove*, *Bunsen*) von angegebener Größe zu erhalten waren. Ein größeres Interesse aber besteht darin, daß zweitens die von

einem gemessenen Strome in einem beschriebenen Drahtwiderstande entwickelte Wärme gemessen wird, daß sich also in dem Aufsatze die Daten zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents finden. Das historische Interesse hieran bleibt bestehen, auch wenn begreiflicherweise die kalorimetrische Messung Mängel hat und der Widerstand des beschriebenen Platindrahtes sich hinterher nur genähert schätzen läßt.

II. An diese Veröffentlichung schloß sich, gleichfalls auf wenigen Druckseiten, unsere zweite; »Über das elektrochemische Äquivalent des Wassers«, unmittelbar an. Das Gesetz der elektrochemischen Äquivalenz war einige Jahre zuvor von *Faraday* entdeckt worden. Mit meisterhaftem Scharfblick erkennt *Weber* die fundamentale Bedeutung der Konstante, welche die chemische und die elektrische Aktion miteinander verbindet, und trotz erschwerenden lokalen Umständen ermittelt er im ersten Anlaufe das Verhältnis mit einem nur unbedeutenden Fehler.

Neben diesem Hauptgegenstande ist auch das Instrument von Bedeutung, womit der Strom hier elektromagnetisch gemessen wurde, die Umkehrung der Tangentenbussole, das erste Bifilargalvanometer, von *Weber* anspruchslos nur deswegen eingeführt, weil seine Tangentenbussole für den Zweck zu unempfindlich war, aber später bekanntlich in mannigfacher Form und Größe in verschiedenen Messungsgebieten von großem Werte geworden. Die Gestalt, die dem ersten Instrumente gegeben war, läßt sich leider nicht mehr genau ermitteln.

Auf eine nicht ganz verständliche Tatsache, daß nämlich in den beiden dicht aufeinander folgenden Aufsätzen den Berechnungen der Stromstärken Formeln zugrunde liegen, nach denen die eine Einheit das Doppelte der anderen ist, wird an Ort und Stelle eingegangen.

III. Nach der Verknüpfung der elektrischen Stromstärke mit ihren magnetischen, chemischen und Wärmewirkungen blieb nur noch die quantitative Zurückführung des Stromes auf seine Ursache offen, auf die durchfließende Elektrizitätsmenge. Diese Aufgabe wird zwölf Jahre später in der Abhandlung von *Weber* und *R. Kohlrausch* gelöst: »Zurückführung der Stromintensitätsmessungen auf mechanisches Maß«*), und in kürzerer Darstellung: »Über die Elektrizitätsmenge, welche

*) Abhandl. d. Königl. Sächs. Gesellsch. d. Wiss. Band 5. 1856.

bei galvanischen Strömen durch den Querschnitt der Kette fließt« *).

Hier wurde der letztgenannte Aufsatz zum Abdruck gewählt, weil der andere umfangreiche ohnehin im Buchhandel einzeln zugänglich ist, und weil die kürzere, die Einzelheiten der verwickelten Messung auslassende Darstellung auch den Vorteil leichterer Verständlichkeit besitzt. Die Entstehungsgeschichte der klassischen Messung ist bedeutend und auch in der Gegenwart noch interessant genug, um, an der Hand der in Gestalt von Manuskripten, Briefen und Vorträgen noch vorhandenen Akten, hier näher auf sie einzugehen.

Der Plan zu der Arbeit stammt von *R. Kohlrausch*, und zwar ursprünglich aus einer kritischen Betrachtung des *Weber*schen elektrischen Grundgesetzes. Im Manuskript eines am 16. Juni 1852 vor der regsamen Naturforschenden Gesellschaft in Marburg von *Kohlrausch* gehaltenen Vortrages befindet sich folgende Stelle:

»Was ist es, was die Wirkung zweier bewegter elektrischer Massen aufeinander nicht bloß abhängig erscheinen läßt von der Entfernung; was ist es, was je nach der Art dieser Bewegung bald schwächend, bald stärkend auf die Kraft wirkt? Wie kann die Änderung einer Kraft nebenher noch als Kraft wirken?

Das sind Fragen freilich von enormer Wichtigkeit, aber auch von so subtiler Art, daß schwerlich ein Naturforscher ihnen ein ernsteres Studium widmen wird, solange ihm noch irgend ein Zweifel an dem *Weber*schen Grundgesetze bleibt. Die Richtigkeit des Gesetzes an und für sich wird keiner bezweifeln, wenn er einmal gesehen hat, wie dasselbe allen Ansprüchen genügt. Aber wird er nicht denken, dasselbe sei, nur in potenziertem Maßstabe, doch bloß ein mathematischer Ausdruck, ebenso wie *Ampères* Gesetz; und die in dem Ausdrucke vorkommenden Zeichen, nämlich der erste und zweite Differentialkoeffizient der Entfernung, ständen in ihm, wer weiß, aus welchem wirklichen inneren ganz anderen Grunde und fielen ganz zufällig mit dem zusammen, was wir uns bildlich unter ihnen vorstellen, nämlich die relative Geschwindigkeit und die relative Beschleunigung?

Wer sagt uns denn überhaupt, ob unsere Vorstellung vom Doppelstrome, die freilich aus vielen Gründen so«

*) Pogg. Ann. 99, 10. 1856.

»gebildet ist, ob also die Idee, als bewege sich ein Fluidum, Elektrizität genannt, in dem geschlossenen Leiter von Ort zu Ort, richtig ist? Konnte man doch auch durch die Emissionstheorie fast alles Optische erklären, und doch war diese falsch! Und beruht nicht am Ende die Auslegung des vielleicht zufällig gerade allen Erfahrungen sich anschließenden Gesetzes auf der bestimmten Annahme der wirklichen Fortbewegungen der Elektrizität, also lediglich auf der bloßen Ortsänderung?

Wenn nun ein Gesetz, d. h. ein mathematischer Ausdruck für eine Kraft unzweifelhaft richtig ist, wie dies beim *Weber*schen elektrischen Grundgesetze der Fall ist, und wenn man für die darin vorkommenden Zeichen, also für $\frac{1}{c^2}\frac{dr^2}{dt^2}$ und $\frac{2r}{c^2}\frac{d^2r}{dt^2}$ eine ganz bestimmte Auslegung nicht zu finden vermag, so soll man nach Wegen suchen, die aussagen, ob diese Auslegung die richtige ist oder nicht, und ein solcher Weg bietet sich uns in diesem Falle dar.

Man stelle auf dem Wege des Experiments Verhältnisse dar, in welchen elektrische Massen unzweifelhafte, nämlich mechanisch hervorgebrachte relative Geschwindigkeiten und Beschleunigungen gegeneinander besitzen und beobachte, ob die aus dem *Weber*schen Grundgesetze hervorgehenden Wirkungen wirklich eintreten.

Treten sie ein, so ist nicht nur die Auslegung des Gesetzes richtig, sondern wir wissen auch, daß der Strom in einer wirklichen Fortbewegung der Elektrizität besteht. Treten sie ein, so entsteht die bestimmte Aussicht, daß wir nicht nur den in jener Formel befindlichen Koeffizienten $\frac{1}{c^2}$ seiner Größe nach bestimmen können, sondern daß wir bestimmte Angaben erfahren, wie groß die Geschwindigkeit, nicht der Stromwelle, denn daran wird jetzt schon mit Glück gemessen, sondern des Stromes selbst ist, und namentlich auch, wie groß das Quantum der neutralen Elektrizität ist, welches am Strome sich beteiligt.

So würde also nicht nur die brennende Neugier der Physiker in Beziehung auf einige Punkte, an deren Erforschung sie seit einer Reihe von Jahren vergeblich gearbeitet haben, befriedigt, sondern es würde weit wichtigeres geleistet für die Wissenschaft, es würde der Begriff von Kraft,«

»dieses Fundament der ganzen Naturforschung, wesentlich modifiziert, und es wäre zu der weiteren Erforschung der inneren Ursachen dieser Modifikation ein neues, weites Feld geöffnet.

Treten die nach *Webers* Grundgesetz zu erwartenden Erscheinungen nicht ein, so hat man dennoch ein positives Resultat, sobald man beweisen kann, daß die Umstände derart waren, daß sie hätten eintreten müssen. Da nämlich die Wirkungen an den ganz unbekannten Koeffizienten $\frac{1}{c^2}$ geknüpft sind, könnte immerhin behauptet werden, sie seien zu klein, um irgend beobachtet zu werden. Es gibt aber glücklicherweise ein Mittel, in diesem Falle zu entscheiden, daß sie hätten bemerkt werden müssen.

Sie sehen, daß also auch das ausbleibende Resultat von sehr großer Wichtigkeit für die Physik ist, indem es ziemlich positiv sagt, daß wir mit dem Strome und dann wohl auch mit der Elektrizität überhaupt bisher eine ganz falsche Idee verbunden haben, das kräftigste Anregungsmittel zur Produktion neuer Ideen über die Elektrizität, dieses wunderbaren Agens, dessen Behandlung in den physikalischen Lehrbüchern gewiß die Hälfte der Seiten schon einzunehmen pflegt.«

Die Diskussion der verschiedensten Möglichkeiten, die gestellten Fragen zu beantworten, führt *Kohlrausch* dann zu dem folgenden generellen Entwurfe eines Versuchsplanes:

»1. Man lasse einen mit Elektrizität geladenen rotierenden Ring auf einen elektrischen Punkt in seiner Ebene wirken. (Die Ausführung ist voraussichtlich mit großen Schwierigkeiten verbunden.)

2. Man lasse einen mit Elektrizität geladenen Ring auf eine Magnetnadel wirken. (Die Ausführung bietet nicht nur geringere Schwierigkeiten, sondern zugleich wegen der Kontrolle über die Notwendigkeit der Wirkung, im Falle des Gelingens oder Nichtgelingens, ein positives Resultat und verdient deswegen vor allen anderen den Vorzug.)

3. Man suche durch den geladenen, rotierenden Ring Induktionsströme zu erhalten. (Wenig Aussicht auf sichtbaren Erfolg.)

4. Man suche durch einen rotierenden Doppelstrom in seiner Ebene freie Elektrizität zu erzeugen. (Hierbei sind erst noch einige theoretische Punkte zu bereinigen.)«

Die Methoden 1, 3 und 4 werden vom Vortragenden als wenig aussichtsvoll bezeichnet. Nr. 2 enthält die gestellte Aufgabe, die Bestimmung des Verhältnisses v; freilich ganz abweichend von der nachher zur Ausführung gebrachten Form: es sollte die durch Konvektion bewegte Elektrizität auf ihre magnetische Wirkung untersucht werden.

Kohlrausch traf alsbald Vorbereitungen hierzu. Die Naturforschende Gesellschaft bewilligte auf Grund des gehaltenen Vortrages 250 Thaler für einen Mechanismus, der, mittels einer Dampfsirene oder einer Übertragung bewegt, dem geladenen Ringe die schnelle Umdrehung (gegen 800 in einer Sek.) erteilen sollte.

In einem Briefe des um die Ausführung ersuchten Gründers der bedeutenden Kasseler Maschinenfabrik, *K. A. Henschel* vom 12. Juni 1852 lautet aber eine Stelle, die um des bedeutenden Schreibers und um ihrer Form willen einen Abdruck verdient, folgendermaßen:

»Ich hole eben die in meinem anderen Schreiben in bestem Glauben noch zur Seite gelassene Beantwortung der Frage nach: wieviel Revolutionen pro Sek. kann Ihre hohle Kapsel am anderen Ende der Spindel vertragen, ehe sie berstet und mit ihren Scherben den beobachtenden Naturforscher durchbohrt?

Leider findet sich da, daß die den Ring zerreißende Kraft an jeder Stelle des Umfangs 33 500 Pfund beträgt, während der Querschnitt des Messings nur mit 25 725 Pfund Widerstand leistet. Und da doch wenigstens die doppelte Widerstandsfähigkeit vorhanden sein müßte, so würde auch ein Ring aus Gußstahl nicht ausreichen, den Sie als gesinnungsuntüchtig ohnehin ja nicht gebrauchen können. Daher kein anderer Rat als: der ganzen Formel einen Bescheidenheitskoeffizienten beizusetzen, der die Umgangszahl auf zirka 500 pro Sek. herabdrückt.«

Ungeachtet dieser Hindernisse verfolgte *Kohlrausch* den Plan weiter. Ein Getriebe wurde hergestellt*). In der Korrespondenz mit *Weber*, welcher in liebenswürdiger Weise auch

*) Das Getriebe hat nachher in Marburg und dann in Göttingen zu einem Rotationsinduktor für elektrische Wellen in einer langen Leitung gedient, die von *Weber* und *Kohlrausch* untersucht wurden. Die Experimentaluntersuchung geriet durch den bald erfolgenden Tod des letzteren ins Stocken. Den Abschluß der Arbeit hat dann *Webers* Abhandlung: »Über elektrische Schwingungen«, gebildet.

bei der Kritik seines eigenen Gesetzes Schwierigkeiten zu lösen bereit war, traten indessen die zu erwartenden Hemmnisse immer deutlicher hervor. *Weber* schätzt die Geschwindigkeit, welche der elektrischen Ladung gegeben werden müßte, um eine zur genauen Messung genügende magnetische Kraft zu geben, noch höher als *Kohlrausch*, und so wurden die in dem Vortrage entwickelten Pläne zunächst in die bescheidenere Aufgabe verwandelt, die magnetische Wirkung einer statisch gemessenen Elektrizitätsmenge bei dem Durchfließen eines Multiplikators zu bestimmen.

Diese Wendung ist eine glückliche zu nennen, denn die wenigen, *Kohlrausch* noch beschiedenen Lebensjahre würden nicht ausgereicht haben, die andere Arbeit, deren Schwierigkeiten ja noch in der neuesten Zeit hervorgetreten sind, zu bewältigen. Und *Weber* schrieb, daß er für seine Person, »da ihm die Ausführung so feiner Versuche mit statischer Elektrizität fern liege, sich auf die Aufgabe einzulassen fürchte.«

Über den weiteren Gang genügt es zu erwähnen, daß *Kohlrausch* zuerst die stetige Wirkung des von einer Elektrisiermaschine gelieferten Stromes auf eine Multiplikatornadel ins Auge faßte; die Ergiebigkeit der Maschine in elektrostatischem Maße sollte aus der Ladungszeit einer großen Batterie von auszumessender Kapazität ermittelt werden. Zahlreiche Versuchsreihen in dieser Hinsicht liegen vor. Die Reibungselektrisiermaschine hat aber wohl die vorausgesetzte Konstanz der Wirkung vermissen lassen.

Bei der alsdann angenommenen Messung des Stromstoßes einer Kondensatorentladung kam auch ein Platten-Kondensator in Frage, dessen Kapazität nach der Formel von *Clausius* berechnet werden sollte. Schließlich blieb man aber bei der Leidener Flasche mit empirisch zu bestimmender Kapazität stehen.

Als Vorbereitung zum elektrostatischen Teile der Messung diente *Kohlrauschs* Konstruktion eines, damals vollkommen fehlenden, zur Potentialmessung geeigneten Instrumentes, des Sinuselektrometers, sowie seine eingehende Erforschung der Gesetze des elektrischen Rückstandes.*)

Der den Verfassern im J. 1857 verliehene Maximilianspreis wurde von einem Schreiben des damaligen Ordenskanzlers *Liebig* begleitet, in welchem gesagt wird:

---

*) *R. Kohlrausch*, Pogg. Ann. 88, 497. 1853, und 91, 56. 1854.

»In diesen Untersuchungen, die sich ebenso sehr durch Scharfsinn wie durch Umsicht und Beharrlichkeit auszeichnen, ist es Ihnen gelungen, den Weg von den statischen zu den dynamischen Erscheinungen zu bahnen und alle Stromintensitätsmessungen, die chemischen, elektrodynamischen und elektromagnetischen auf mechanisches Maß zurückzuführen. Indem durch Ihre Entdeckungen diese Erscheinungen auf ihre gemeinsame Quelle zurückgeführt sind, haben dieselben schon jetzt einen wahrhaft fördernden Einfluß auf die Entwicklung der physikalischen Wissenschaft ausgeübt.«

Der Einfluß sollte bald in seinem Glanzpunkte hervortreten, denn die Arbeit war der experimentelle Vorläufer eines Hauptergebnisses der *Maxwell*schen elektromagnetischen Lichttheorie, nämlich der Identität der Lichtgeschwindigkeit im Äther mit dem von *Weber* und *Kohlrausch* gemessenen Verhältnis v der elektromagnetischen zur elektrostatischen Elektrizitätseinheit.

In seiner Abhandlung *) »*On physical lines of force*«, Part III, schreibt *Maxwell* 1862:

»The velocity of transverse undulations in our hypothetical medium, calculated from the electromagnetic experiments of MM. *Kohlrausch* and *Weber*, agrees so exactly with the velocity of light calculated from the optical experiments of M. *Fizeau*, that we can scarcely avoid the inference that light consists in the transverse undulations of the same medium which is the cause of electric and magnetic phenomena«.

Und in *Maxwells* berühmter Abhandlung: »*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*«, Part IV, *Electromagnetic Theory of light*, lautet die entscheidende Stelle **):

»Hence the velocity of light deduced from experiment agrees sufficiently well with the value of v deduced from the only set of experiments we as yet possess. The value of v was determined by measuring the electromotive force with which a condenser of known capacity was charged, and then discharging the condenser through a galvanometer, so as to measure the quantity of electricity in it in electro-

---

*) Philos. Mag. Jan. & Feb. 1862. The Scientific Papers of *J. C. Maxwell*, Vol. I, p. 500. 1890.

**) Royal Society Transactions Vol. 155; *Maxwell*, Papers Vol. I, p. 580. 1890.

magnetic measure. The only use made of light in the experiment was to see the instruments. The value of V found by M. *Foucault* was obtained by determining the angle through which a revolving mirror turned, while the light reflected from it went and returned along a measured course. No use whatever was made of electricity or magnetism.

The agreement of the results seems to shew that light and magnetism are affections of the same substance, and that light is an electromagnetic disturbance propagated through the field according to electromagnetic laws.«

IV. Von *Webers* grundlegenden Abhandlungen über Widerstandsmessungen wird zunächst die erste Veröffentlichung: »Messungen galvanischer Leitungswiderstände nach einem absoluten Maße«, aus *Poggendorffs* Annalen (1851) abgedruckt. Die ausführliche Abhandlung folgte bald darauf und ist als »Elektrodynamische Maßbestimmungen, insbesondere Widerstandsmessungen« aus den Abhandlungen der K. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften einzeln im Buchhandel zu haben.

Es wird zuerst die absolute elektromagnetische Widerstandseinheit definiert, und zwar interessanterweise — während man damals von den »Dimensionen« einer abgeleiteten Einheit noch nicht sprach — gleich mit der Bemerkung, daß diese Größe nur von der Einheit der Geschwindigkeit abhängt. Dann werden an einer in großem Maßstabe ausgeführten Leitung Messungen nach der Induktions- und der Dämpfungsmethode ausgeführt und deren Ergebnis auf die *Kirchhoff-Neumann*sche Induktionskonstante wie auf *Kirchhoffs* und *Jacobis* Widerstandseinheiten angewandt. Der Aufsatz schließt mit einer Betrachtung über die Konstanten der elektrischen Gesetze, welche von der Wahl der Maßeinheiten abhängen.

V. Endlich wird über die absolute elektrische Widerstandsbestimmung auch durch die Wiedergabe eines Teiles aus einer weniger bekannt gewordenen späteren Abhandlung gehandelt, in der *Webers* interessante materialistische Ansichten über die Elektrizität in charakteristischer Weise ausgedrückt sind; Ansichten, die in den letzten Jahren, durch die Entwicklung des Begriffs der Elektronen eine erhöhte Bedeutung gewonnen haben, nachdem sie Jahrzehnte hindurch wohl als veraltet betrachtet worden waren.

Diese im 10. Bande der Abhandlungen der Göttinger Gesellschaft der Wissenschaften 1862 erschienene, zuvor uns Mit-

gliedern des Mathematisch-physikalischen Seminars in Göttingen vorgetragene Abhandlung: »Zur Galvanometrie« ist für die Sammlung der Klassiker zu umfangreich und auch in manchen Teilen von zu speziellem Interesse. Von diesen Teilen soll deswegen nur eine Analyse ihres Inhalts gegeben werden. Einleitung und Schluß dagegen, welche die allgemeinen Gesichtspunkte und theoretischen Ansichten *Weber*s enthalten, werden ausführlich gegeben.

Es möge gestattet sein, hier eine Meinung zu äußern, welche, soviel mir bekannt ist, von zahlreichen Forschern geteilt wird. Während auf der einen Seite feststeht, daß die absoluten Maße des elektrischen Stromes, welche schließlich zur Einigung über die elektrischen Einheiten geführt haben, wesentlich *Wilhelm Weber* zu verdanken sind, ist sein Name in den Bezeichnungen »Ohm«, »Volt« und »Ampère« der drei Grundgrößen ausgefallen. Die Gründe, welche hierzu führten, habe ich als stichhaltige niemals anzuerkennen vermocht. Es wird sich aber Gelegenheit finden, das damals Versäumte nachzuholen. Denn zweifellos war es ein Versehen, die Stromeinheit nicht als *CGS* einzuführen, sondern als den zehnten Teil hiervon. Die große Unbequemlichkeit dieser Festsetzung kommt zur Geltung, sobald man mit den magnetischen Wirkungen eines Stromes zu tun hat, und die Kunstgriffe, durch welche man den Widerspruch gegen die im Magnetismus allgemein angenommenen *CGS*-Einheiten, z. B. gegen die international eingeführte *CGS*-Feldstärke zu beseitigen sucht, geben nur ein dürftiges Resultat. Das einzige durchgreifende Mittel besteht darin, daß man in magnetischen Beziehungen auch mit der *CGS*-Stromstärke rechnet.

Wie man für die Einheit der Feldstärke die Bezeichnung 1 *Gauß* angenommen hat, so sollte meines Erachtens für die *CGS*-Stromeinheit der Name 1 *Weber* eingeführt werden.

Anmerkungen.

1) *Zu S. 3.* Der zitierte, einige Seiten zuvor in den Resultaten des Magn. Vereins abgedruckte Aufsatz, in welchem Größe und Eigenschaften der Reibung magnetischer Flächen untersucht werden, bietet das Interesse, daß in ihm die *Weber*sche Stromeinheit zum ersten Male vorkommt und, wenn auch nicht zu einer scharfen Messung, doch zu einer Schätzung von Stromstärken benutzt wird.

Die Anregung zu jener kleinen Experimentaluntersuchung hatte jedenfalls der Gedanke gegeben, daß die magnetische Reibung, auf Eisenbahnen angewendet, Vorteile vor der durch das Gewicht der Lokomotive bedingten Reibung bieten werde. »Um einen Begriff von der Stärke des magnetisierenden Stromes zu erhalten«, wurde dieser in definierter Lage geradlinig unter einer Magnetnadel vorübergeführt. Aus deren Ausschlage berechnete *Weber*, indem er die gesamte Richtkraft des Stromes auf den Ort der Nadel nach dem *Biot-Savart*schen Gesetz integrierte, »daß ein 14,7 mm langes Stück des Stromes als vertikaler Kreisbogen von 14,7 mm Halbmesser, in dessen Mittelpunkt die Nadel sich befindet, auf letztere ein gleiches Moment wie der horizontale Teil des Erdmagnetismus ausüben würde.« (Den letzteren $= 0{,}18$ CGS gesetzt, erhält man jene erste gemessene Stromstärke, also $= 0{,}18 \cdot 1{,}47 = 0{,}26$ *Weber*schen CGS-Einheiten.)

2) *Zu S. 7.* Mit der von *Weber* später und jetzt allgemein angenommenen Definition der Stromeinheit stimmt diese Formel nicht; es müßte vielmehr 2π statt π im Nenner stehen. So wird in der Tat von *Weber* später in *Poggendorffs* Annalen (55, S. 31, 1842) geschrieben.

Aus der Fußnote *) scheint hervorzugehen, daß das Weglassen des Faktors 2 durch folgendes veranlaßt worden ist. Beabsichtigt war von *Weber*, als Einheit den Strom zu wählen, der, wenn er die Flächeneinheit umgeht, in der Entfernung ebenso wirkt, wie die Einheit »des freien Magnetismus«. Letzterer Ausdruck kann von vornherein nicht zutreffen, denn ein geschlossener Strom ist nicht einem freien Magnetismus gleichwertig, sondern einem magnetischen Moment. Es scheint so, als habe *Weber* hier die halbe Wirkung eines Magnets mit der Wirkung seines Poles verwechselt. In der Fußnote *) wird auch gesagt, daß die der Formel zugrunde liegende Stromeinheit halb so groß sei wie die in der Abhandlung über magnetische Friktion gebrauchte, welche letztere auch der folgenden Messung des elektrochemischen Äquivalents zugrunde liegt.

Falls diese Erklärung der Differenz zutrifft, so stellt der Überlegungsfehler eine charakteristische Illustration zu den, unserem Gedächtnis jetzt entschwundenen Schwierigkeiten der Überlegung dar, welche die ersten Größenbetrachtungen über die abgeleiteten elektromagnetischen Einheiten begleitet haben mögen.

3) *Zu S. 10.* Bei den Koeffizienten der Formel scheint eine Verwechslung vorzuliegen; denn um die vorausgehenden Beobachtungen durch eine quadratische Formel genähert darzustellen, muß man statt 0,95 und 0,015 etwa 0,7 und 0,01 wählen. — Da diese kalorimetrische Bestimmung mit einem absolut ausgemessenen Strome jedenfalls die erste in der Literatur vorhandene ist, so wird man das mechanische Wärmeäquivalent daraus zu schätzen suchen. Für das damalige, nach den Literaturangaben recht verschiedene »Platin« den spezifischen Widerstand $= 20 \cdot 10^{-6}$ Ohm · cm angenommen, berechnet sich der Drahtwiderstand = 0,4 Ohm. Die Stromstärke ist für 52° gleich 3,6 Amp., die Stromleistung also $= 3{,}6^2 \cdot 0{,}4 = 5{,}2$ Watt. Diese gaben in der Sekunde $\frac{1}{60} \cdot 0{,}70 \cdot 114 = 1{,}33$ Gramm-Kal.; danach kämen auf 1 Gramm-Kal. 3,9 Wattsekunden oder $3{,}9 \cdot 102 = 400$ Grammgewichtmeter, also die richtige Größenordnung.

Eine Bemerkung drängt sich bei diesem Versuche auf. Hätte *Weber* seine in den nächsten Zeilen gemachte Annahme, daß die Wärmeentwicklung der Stromstärke proportional sei, auf ihre logische Zulässigkeit geprüft, so würde er sie mindestens für sehr unwahrscheinlich gehalten haben, denn sie führt zu

der Folgerung, daß Umkehren der Stromrichtung das Vorzeichen der Wärmeentwicklung umkehrt. Auch *Rieß'* Versuche über Batterieentladung machten die Annahme bereits unwahrscheinlich. Würde *Weber* daraufhin noch mit einer anderen Stromstärke gemessen haben, so hätte er zweifellos sofort das richtige, ein Jahr später von *Joule* aufgestellte Gesetz gefunden.

4) *Zu S. 26.* Das Verhältnis betrug nahe 30 : 1; seine Bestimmung mittels zahlreicher Versuche bildete einen der schwierigsten Punkte und war kürzlich Gegenstand einer abfälligen Kritik (*H. Abraham*, Rapports au Congrès Internat. de Physique, II, p. 248, 1900). Letztere darf aber, insofern sie sich auf den großen mittleren Fehler stützt, der besonders durch zwei sehr stark nach entgegengesetzter Richtung herausfallende Beobachtungen entsteht, als unzutreffend bezeichnet werden. Diese Abweichungen können nämlich unmöglich von gewöhnlichen Versuchsfehlern herrühren; es weist eine aufmerksame Betrachtung der Zahlen unzweideutig darauf hin, daß Ablese- oder Schreibfehler um 1, bez. 2 ganze Grade des Sinuselektrometers vorliegen. Die Verfasser begnügen sich mit der Bemerkung, daß das Mitrechnen oder das Auslassen der verdächtigen Zahlen zufällig von geringfügigem Einfluß auf das Resultat ist.

Es hat Interesse, aus der obigen Verhältniszahl 30 die Kapazität der Flasche, jedenfalls des ersten diesbezüglich ausgemessenen Objektes, und die Spannung auszurechnen, die bei den Flaschenentladungen zur Anwendung kam. Da die große Kugel nahe 16 cm Halbmesser hatte, so berechnet sich zunächst die elektrostatische Kapazität der Flasche zu $16 \times 30 = 480$ cm. Die entladenen, durch den Multiplikator fließenden Elektrizitätsmengen beliefen sich nun auf 36000 bis 50000 elektrostatische [*CGS*-]Einheiten; demnach betrugen die angewandten Spannungen bis etwa 100 [*CGS*] oder 30000 Volt, d. h. die Schlagweiten etwa 1 cm.

Diese große Spannung (welche also dadurch bedingt war, daß man eine Flasche von kleiner Kapazität anwenden mußte, um diese Kapazität durch die Verteilungszahl gegen die Kugel genügend scharf bestimmen zu können), wird zur Erklärung eines sonst nicht verständlichen Umstandes dienen. Grundsätzlich einfacher würde nämlich offenbar ein Verfahren gewesen sein, bei welchem das Sinuselektrometer, auf absolutes

Potential geeicht, direkt zur Messung des Potentials der Flasche im Augenblicke ihrer Entladung benutzt worden wäre, statt daß das schwierige Verfahren mit der *Coulomb*schen Wage bei jeder Entladung herangezogen wurde. Die großen Elektrizitätsverluste durch die hohe Spannung werden ersteres verhindert haben.

Zu S. 26 Fußnote. Das Bedenken *G. Wiedemanns*, daß die Isolation vielleicht ungenügend gewesen sei, läßt die zur Prüfung dieses Einwandes, welchen die Verfasser sich natürlich selbst machten, besonders angestellten und zahlenmäßig angegebenen Kontrollen unberücksichtigt.

5) *Zu S. 27.* Diese Aufgabe hatte die umfangreichen Beobachtungen *R. Kohlrauschs* über Rückstandsbildung veranlaßt, bei denen besonders diese kleine Flasche untersucht worden war. Daß der Rückstand hier besonders klein war, nämlich $4\frac{1}{2}$ Prozent als größten Wert betrug, ist natürlich von Bedeutung, wie ich einem früher gemachten Einwande gegenüber bereits hervorgehoben hatte (Pogg. Ann. **157**, S. 641, 1876).

6) *Zu S. 28.* Der mittlere Durchmesser des Multiplikators betrug 27 cm, die Nadellänge 6 cm, so daß die Korrektionen der schematischen Formel sich genau genug berechnen ließen.

7) *Zu S. 29.* Der Faktor A wird, indem das magnetische und das Trägheits-Moment der Nadel herausfällt, aus Windungszahl und Abmessungen des Multiplikators, Intensität des Erdmagnetismus, Schwingungsdauer und Dämpfung der Nadel gebildet.

8) *Zu S. 29.* Der gebräuchlichen Definition, welche die ganze, und nicht wie hier nur die positive, fließende Elektrizitätsmenge rechnet, entspricht das Doppelte der Zahlen. Die von dem elektromagnetisch gemessenen Strome Eins in 1 Sek. durch den Querschnitt geführte Elektrizitätsmenge beträgt also hiernach $3107 \cdot 10^8$ elektrostatische Einheiten; alles im [Mm, Mg, Sek]-System gemessen. Da sich bei dem Übergange zum [CGS]-Systeme die elektromagnetische Einheit verhundertfacht, die elektrostatische vertausendfacht, so gilt also im CGS-System das Verhältnis $v = 3107 \cdot 10^7$.

Nach *Maxwells* Theorie darf jetzt die Lichtgeschwindigkeit $3000 \cdot 10^7$ cm/sec wohl als der verbürgte Wert von v angenommen werden.

Erwägt man, mit Rücksicht auf die vor 50 Jahren vorhandenen primitiven und schwerfälligen Mittel und geringen

Erfahrungen, die Schwierigkeiten, welche bei dieser ersten exakten absoluten Messung nach elektrostatischen Einheiten überwunden werden mußten, so erscheint die Annäherung des ersten Resultats an den wahren, damals nicht einmal der Größenordnung nach bekannten Wert als eine bewundernswerte Leistung. Nur durch das Zusammenwirken der damaligen beiden Meister in den elektromagnetischen und den elektrostatischen Methoden ermöglicht, bildet sie einen klassischen Abschluß der Messungen mit Reibungselektrizität.

Reichlich ein Jahrzehnt später beginnt, nachdem *Maxwells* Theorie das Interesse an dem Verhältnis v in den Vordergrund geschoben hatte, die neue glänzende, mit modernen Mitteln ausgeführte Reihe von Messungen dieser Größe, mit *Maxwell* und *William Thomson* anhebend. Es hat geraume Zeit gedauert, bis die Genauigkeit jener ersten Messung übertroffen war, und bis schließlich, vermöge der großenteils bei diesen Arbeiten ausgebildeten neuen Messungsmethoden und Instrumente, Werte erzielt worden sind von ähnlicher Zuverlässigkeit wie der aus der Lichtgeschwindigkeit abgeleitete Wert.

9) *Zu S. 31.* Der Betrachtung liegt die damals herrschende, durch *Hittorfs* Arbeiten dann beseitigte, Anschauung zugrunde, daß der elektrische Strom das Wasser selbst zersetze, welches »durch den Zusatz der Schwefelsäure leitend geworden war«. Die zahlenmäßigen Folgerungen sind also nicht aufrecht zu erhalten; die Kräfte, welche zur Verschiebung der Ionen notwendig sind, fallen, richtig berechnet, nicht ganz so groß aus. Immerhin behält diese erste Einführung mechanischer Kräfte in die Elektrolyse eine historische Bedeutung. Der Kenntnis der Stromstärke in elektrostatischen Einheiten hätte die Rechnung übrigens nicht einmal bedurft, denn das Produkt aus elektromotorischer Kraft und Stromstärke, welches die Arbeitsleistung gibt, läßt sich aus jedem Maßsysteme entnehmen.

10) *Zu S. 32.* Das spezifische Gewicht 1,25 entspricht einer Lösung von etwa 27 Proz. SO_3 oder 73 Proz. H_2O; also enthalten $\frac{10}{9}$ cmm der Lösung $1{,}25 \cdot 0{,}73 \cdot \frac{10}{9} = 1$ mg Wasser. Die Lösung wurde offenbar als die bestleitende damals bekannte wässerige Lösung gewählt; die Kräfte würden sich für eine andere Lösung noch größer berechnet haben.

11) *Zu S. 34.* Das von hieran Abgedruckte ist dem ausführlichen Aufsatze (Abhandl. d. K. Sächs. Ges. d. Wiss., V.) entnommen. Das Manuskript der beiden Teile ist nicht mehr

vorhanden, sie stammen aber, nach Inhalt und Form beurteilt, aus *Webers* Gedankenkreise und Feder. Der erste Teil enthält eine originelle Betrachtung, welche der modernen Elektronentheorie nahe steht. Der zweite zeigt jedenfalls zum ersten Male einen Weg, auf dem man die gewöhnlich angenommenen drei Grundeinheiten auf eine einzige, etwa die Längeneinheit zurückführen kann. Nach den jetzigen Anschauungen würde man nur eine etwas andere Form dafür wählen.



F. Kohlrausch.

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.

Nr. 81. [illegible] Untersuchungen über Elektricität. I. u. II. Reihe. [illegible] Mit 41 Figuren im Text. Herausgegeben von A. J. von Oettingen. (96 S.) ℳ 1.50.

» 86. —— —— III. bis V. Reihe. (1833.) Mit 15 Figuren im Text. Herausgegeben von A. J. von Oettingen. (104 S.) ℳ 1.60.

» 87. —— —— VI. bis VIII. Reihe. (1834.) Mit 48 Figuren im Text. Herausgegeben von A. J. von Oettingen. (180 S.) ℳ 2.60.

» 93. **Leonhard Euler,** Drei Abhandlungen üb. Kartenprojection. (1777.) Herausg. von A. Wangerin. Mit 9 Fig. im Text. (78 S.) ℳ 1.20.

» 96. **Sir Isaac Newton's** Optik oder Abhandlung über Spiegelungen, Brechungen, Beugungen und Farben des Lichts. (1704.) Übersetzt und herausgegeben von William Abendroth. I. Buch. Mit dem Bildniss von Sir Isaac Newton u. 46 Fig. im Text. (132 S.) ℳ 2.40.

» 97. —— —— II. u. III. Buch. Mit 12 Fig. im Text. (156 S.) ℳ 2.40.

» 99. **R. Clausius,** Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen. (1850.) Herausgegeben von Max Planck. Mit 4 Figuren im Text. (55 S.) ℳ —.80.

» 100. **G. Kirchhoff,** Abhandlungen über Emission und Absorption: 1. Über die Fraunhofer'schen Linien. (1859.) — 2. Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme. (1859.) — 3. Über das Verhältniss zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen der Körper für Licht und Wärme. (1860—1862.) Herausgegeben von Max Planck. Mit dem Bildniss von G. Kirchhoff u. 5 Textfig. (41 S.) ℳ 1.—.

» 101. —— —— Abhandlungen über mechanische Wärmetheorie: 1. Über einen Satz der mechanischen Wärmetheorie u. einige Anwendungen desselben. (1858.) — 2. Bemerkung über die Spannung des Wasserdampfes bei Temperaturen, die dem Eispunkte nahe sind. (1858.) — 3. Über die Spannung des Dampfes von Mischungen aus Wasser und Schwefelsäure. Herausgegeben von Max Planck (48 S.) ℳ —.75.

» 102. **James Clerk Maxwell,** Über physikalische Kraftlinien. Herausgegeben von L. Boltzmann. Mit 12 Textfig. (147 S.) ℳ 2.40.

» 106. **D'Alembert,** Abhandlung über Dynamik, in welcher die Gesetze des Gleichgewichtes und der Bewegung der Körper auf die kleinstmögliche Zahl zurückgeführt und in neuer Weise abgeleitet werden, und in der ein allgemeines Princip zur Auffindung der Bewegung mehrerer Körper, die in beliebiger Weise aufeinander wirken, gegeben wird (1743). Übersetzt und herausgegeben von Arthur Korn. Mit 4 Tafeln. (210 S.) ℳ 3.60.

» 109. **Riccardo Felici,** Über die mathematische Theorie der electrodynamischen Induction. Übersetzt v. B. Dessau. Herausg. von E. Wiedemann. (121 S.) ℳ 1.80.

» 114. **Alessandro Volta,** Briefe über thierische Elektricität. (1792.) Herausg. v. A. J. von Oettingen. (162 S.) ℳ 2.50.

» 115. **Horace Bénédicte de Saussure,** Versuch über die Hygrometrie. I. Heft. (1783.) Mit einer Tafel und Vignette. Herausgegeben von A. J. von Oettingen. (168 S.) ℳ 2.60.

» 118. **Alessandro Volta,** Untersuchungen über den Galvanismus. (1796 bis 1800.) Herausg. von A. J. von Oettingen. (99 S.) ℳ 1.60.

» 119. **Horace Bénédicte de Saussure,** Versuch über die Hygrometrie. II. Heft. (1783.) Mit zwei Figuren. Herausgegeben von A. J. von Oettingen. (170 S.) ℳ 2.40.

Nr. 125. **John Mayow**, Untersuch. üb. d. Salpeter u. d. salpetrigen Luftgeist, d. Brennen u. d. Athmen. Hrsg. v. F. G. Donnan. (56 S.) ℳ 1.—.

» 126. **Michael Faraday**, Experimental-Untersuchungen über Elektricität. (Aus den Philosoph. Transact. f. 1835.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen IX. b. XI. Reihe. Mit 15 Figuren i. Text. (104 S.) ℳ 1.80

» 128. —— —— Experimental-Untersuchungen über Elektricität. (Aus den Philosoph. Transact. f. 1838.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen XII. und XIII. Reihe. Mit 29 Figuren im Text. (133 S.) ℳ 2.—

» 131. —— —— Experimental-Untersuchungen über Elektricität. (Aus den Philosoph. Transact. f. 1838.) Herausgegeben von A. J. v. Oettingen XIV. und XV. Reihe. Mit 2 Figuren im Text. (48 S.) ℳ —.80.

» 132. **Thomas Andrews**, Über die Continuität der gasförmigen und flüssigen Zustände der Materie und über den gasförmigen Zustand der Materie. On the Continuity of the Gaseous and Liquid State of Matter. Philosophical Transactions of R. S. of London, Vol 159, 1869, p. p. 575—589 and on the Gaseous State of Matter Vol. 166, 1876, p. p. 421—449. Herausgegeben ...n Arthur von Oettingen und Kenji Tsuruta aus Jap... ...it 12 Figuren im Text und in den Anmerkungen. (82 ... ...40.

» 133. **J. H. Lambert**, Abhandlungen zur ... ...mung der Cometen. Insigniores orbitae Cometaru... ...es (1761). Observations sur l'Orbite apparente ... ...771.) Auszüge aus den »Beiträgen zum Geb... ...matik« (1772). Deutsch herausg. und mit Anm... ...von J. Bauschinger. Mit 35 Figuren im ... ℳ 3.40.

» 134. **Michael Faraday**, Experimental... ...er Elektricität. (Aus den Philosoph. Transact... ...eben von A. J. v. Oettingen. XVI. un... ...3 Fig. im Text. (103 S.) ℳ 1.60.

» 135. **C. F. Gauss**, Allgemein... ...der Gestalt von Flüssigkeiten im ... ...chrieben 1829, abgedruckt in ... ...ae scientiarum Gottingensis ... ...dolf H. Weber. Herausg. ... ...3 S.) ℳ 1.20.

» 136. **Michae...** ...gen über Elektricität. (Aus ... ...1846.) Herausgegeben vo... ...IX. Reihe. Mit 11 Fig. im ...

» 137. **August Horstmann**, Abhandlungen zur Thermodynamik chemischer Vorgänge. Herausgegeben von I. H. van't Hoff. Mit 4 Figuren im Text. (72 S.) ℳ 1.20.

» 138. **Christiaan Huygens'** nachgelassene Abhandlungen: Über die Bewegung d. Körper durch d. Stoss. Üb. d. Centrifugalkraft. Hrsg. v. Felix Hausdorff. Mit 49 Figuren im Text. (79 S.) ℳ 1.40.

» 140. **Michael Faraday**, Experimental-Untersuchungen über Elektricität. (Aus den Philosoph. Transact. f. 1846, 1849 u. 1850.) Herausgegeben von A. J. von Oettingen. XX. bis XXIII. Reihe. Mit 11 Figuren im Text. (174 S.) ℳ 3.—.

» 141. **J. F. Encke**, Über die Bestimmung einer elliptischen Bahn aus drei vollständigen Beobachtungen. — **P. A. Hansen**, Über die Bestimmung der Bahn eines Himmelskörpers aus drei Beobachtungen. Herausgegeben von J. Bauschinger. (162 S.) ℳ 2.50.

» 142. **Wilhelm Weber und Rudolf Kohlrausch**, Fünf Abhandlungen üb. absolute el... ...andsmessung. Herausgegeb. von Fried... ...dnissen. (116 S.) ℳ 1.80.

